

## 자동차용 방진고무

전 영 식

### I. 방진고무(Rubber spring, Rubber Vibration Isolator)

방진고무는 振動 衝擊의 傳達防止 또는 緩衝의 목적으로 사용되는 加橋고무로 정의되고 있다. (JIS K6385, K6386). 이 정의에 의하면 소위 "완충고무"는 방진고무에 속한다. 더 넓게 해석하면 "고무製の spring(Rubber spring)"이라고 말할 수 있다. 고무제품의 대다수는 부수적으로 防音性, 防振性을 구비하고 있다. 廣意로 解釋하면 거의 전부 고무제품은 방진고무로서의 측면을 갖고 있다. 예를 들면, 공기주입타이어 등도 鐵材의 마퀴와 비교하면 그 방진성을 곧 이해할 수 있을 것이다. 그러나 일반적으로는 防振 또는 緩衝을 주요 목적으로 한 고무제품만을 防振고무라고 부르고 있는 것이다.

#### 1. 방진고무의 목적

방진고무는 진동, 衝擊絶録의 목적의 傳達經路에 따라 다음의 두 가지로 나눌 수 있다.

##### 1) 能動的 用法(active application)

機械의 運動에 따르는 振動的 外力 또는 衝擊力이 基礎에 傳達되는 것을 防止한다.

##### 2) 受動的 用法(passive application)

基礎에 다른 원인으로 좌우하는 진동 또는 충격적 운동이 기계에 전달되는 것을 방지한다. 예를 들면 디젤 發動機, 진동 conveyer, 鍛造機

나 油壓 press를 방진고무 또는 spring으로 지지하는 것은 능동적 용법의 좋은 예이다. 鐵道車輛 台車의 spring系나 自動車의 현가 장치, 精密機械의 彈性지시 등은 수동적 용법의 實例이다. 能動的 用法에서는 기초에 전달되는 振動的 外力 또는 충격력을 固定한 경우보다도 경감하는 것이 목적이므로 진동공해를 비롯하여 기초운동에 의해 생기는 여러 가지 장해를 除去함과 동시에 기초강도를 절약할 수 있다.

受動的 用法에는 기계(被支持體)를 공간적으로 정지시키는 것이 목적이므로 차량의 경우는 승차감의 改善, 기계의 경우에는 정상적 운동이나 壽命의 延長을 목적으로 한다.

### 2. 방진고무의 특징

방진고무는 고무의 彈性을 이용한 一種의 spring이지만, 同一고무를 넣어도 단지 자유도를 주는 (balance를 좋게 함)것만으로 그 復元力(spring 作用)을 목적으로 하지 않는 것은 고무 packing이라고 부르고 방진고무와 구별한다.



전영식

1984 이학박사(물리화학)  
1983~ 현대자동차 기술연구소 근무  
1990  
1991~ 서일화학(주) 대표이사  
현재

방진고무는 非金屬 spring의 一種이지만, 넓게 사용되고 있는 금속 spring(코일 spring, 판 spring)에 비해 다음의 특징을 갖고 있다.

### 1) 3方向的 spring 정수

방진고무는 形狀 數値를 적당히 選擇하면 3 방향, 예를 들면 上下, 左右, 前後 方向的 spring정수를 希望의 値로 할 수 있다.

通常의 금속 spring은 1방향의 spring 作用밖에 利用할 수 없으므로 3방향의 spring 作用을 利用할 수 있는 것은 방진고무의 큰 特色이다. 이 特色은 고무와 金屬 등이 용이하게 接着되고, 인장, 壓縮, 전단 등 어느 방향에서도 변형될 수 있기 때문이다. (現實적으로 인장방향의 使用例는 적다.)

### 2) 감쇄(減衰 : 내부마찰)

가교고무의 내부마찰은 금속보다 1000배 이상 크다. 共振時에 振幅低下나 衝擊에 의한 자유감쇄 振動의 조기저하를 위해서는 spring에 減衰를 부가할 必要가 있다. 이 때문에 金屬 spring에서도 중복된 spring과 코일 spring과 오일댐퍼의 併用등의 개선책이 필요한 것이다.

이 어느 것도 저주파 진동 경우밖에 有效하지 않다. 이에 대해 고무의 감쇄는 내부마찰에 의한 것이고 고무의 내부마찰은 고무분자 상호간과 고무분자와 충전제간의 상호작용에 의하므로 특히 고주파 진동의 吸收에 적당하다.

그림 1은 동일질량을 각기 코일 spring과 방진고무로 지지, 이들은 진동대에서 가진(加振)한 경우의 주파수 특성을 예시한 것이다. 종축은 질량의 振幅을 데시벨로 표시한 것이고 상세히 표시하면  $20 \log_{10} (a_m/a_t)$ 이다.  $a_m, a_t$  는 각기 질량 및 진동대의 진폭이다. 0dB 以下 ( $a_m < a_t$ )로 되면 彈性支持의 效果가 있는 것으로 되지만(受動的 用法), 코일 spring의 경우는 surging이 현저히 나타난다. 방진고무의 경우는 내부마찰 때문에 별로 surging이 거의 없다. 이 성질 때문에 방진고무는 防音(고체음의 차단)의 목적에도 有效하다.

### 3) 열 가(Cost)

방진고무는 金型에서 제작되는 型製品(mould goods)이므로 양산하면 單價는 싸게 된다. 이상은 방진고무의 장점이지만 反面 다음과 같은 단점도 있다. 이들의 단점은 고무의 선정으로 어느 정도 피할 수 있다.

### 4) 耐고온성, 耐저온성

通常 天然고무제 방진고무를 70°C 이상의 高溫에서 사용하는 것은 무리이다. 고무의 종류에 의해서는 보다 고온에서 있지만, 有機化合物인 고무에 금속정도의 내고온성을 요구하는 것은 무리이다. 고온에서 사용되는 경우에는 고무材料 뿐만 아니라 접착제의 내고온성도 充分히 고려해야 한다. 이들의 問題는 자동차 배기가스의 대책으로서 新열원 (actor burner, 촉매 reactor等)이 엔진의 배기계에 사용되는 경향이 있다. 따라서 engine room이나 배기 관계에 사용되는 방진고무는 검사되어야 한다. 내저온성에서도 glass化에 의한 硬化라는 한계가 있지만 一般用 고무라도 -55°C까지 사용되는 고무가 있으므로 實用上 別로 問題는 없다.

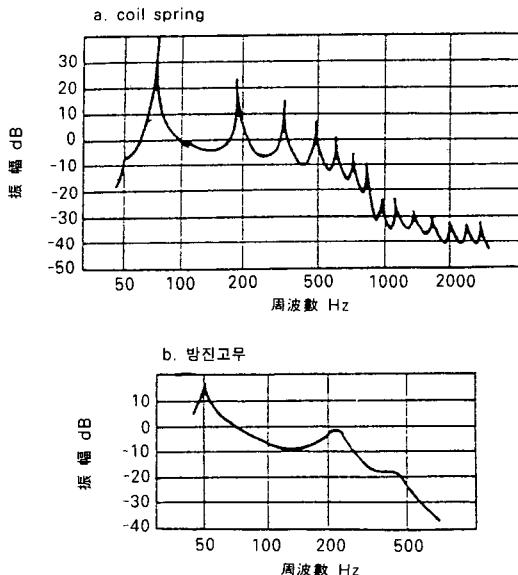


그림 1. 방진고무와 코일 spring의 주파수 특성

5) 耐油性

가교고무를 기름에 침적하면 정도의 차는 있지만 膨潤(swell)하여 경화한다. 그러나 내유성 고무(NBR, Urethane Rubber 등)를 사용하면 石油계 潤滑油에서도 實用 可能하다.

3. 방진고무의 形狀

방진고무를 그 形狀으로 分類하면

- ① 壓縮形
- ② 전단형
- ③ 복합형으로 나눌 수 있다.

이 분류는 편의상의 분류이며, 주요하중(많은 경우 被支持體의 하중)의 방향에 의해 나눈 것이다. 이와 같이 여러 종류의 形狀의 것이 사용되는 것은 방진고무의 3방향 spring정수 비를 광범위한 요구에 통합시킬 必要가 있기 때문이다.

3-1. 압축형 방진고무

대체로 壓縮形은 單位수압면적당 하중을 크게 받으므로 대하중의 경우든지 방진고무부분의 공간의 여유가 적은 경우 자주 사용된다.

그림 2에 있어서 (a)에서 (f)까지는 구형, (g)에서 (k)까지는 각형이라고 한다. 그림에서 (d), (h), (j)의 中間 接着層은  $K_1/K_2$  (上下와 左右방향 spring 정수)를 높게 하고 동 단면적에서 대하중에 견딘다. 또 (e), (f), (i)의 내부 자유적은

$K_1/K_2$ 를 낮게 하고 압축 spring정수를 저하시키는 역할을 한다.  $K_1, K_2$ 는 방진고무의 상하, 좌우 방향의 spring정수를 나타낸다.

표 1. 방진고무의 spring 정수비

形狀	spring정수비 $K_1/K_2$	비 고
壓縮形	4.5이상	
전단형	0.2이하	
조합형	임의	특히 $K_1/K_2 = 0.2 \sim 4.5$ 必要

3-2. 전단형 방진고무

전단형은 주방향의 spring정수를 특히 낮게 하고 싶은 경우에 이용된다. 저하중의 경우든지 저 회전 기기의 지지에 넓게 사용되고 있다. 그림 3에 있어서 (c)에서 (h)까지는 筒形이라 불리고 특히 (e)와 (h)는 경하중, 예를 들면 계기판 등에 사용된다. (f)는 2개를 조합하여 하나의 bushing으로써 축직각방향에 加荷하는 것이 많다. 통형 방진고무에서 自由표면적이 고무의 체적의 비율에 비해 적으면 가교후의 수축 때문에 고무 내부에 큰 잔류응력이 생겨 接着力을 약화시킨다. 이 대책으로써 가교 후 外통을 조이던지 內통을 넓히는 방법이 이용된다. 또한 이 形式에서 直角方向에 주하중이 움직이는 경우에는 內통만 接觸하여 外통에 壓入한 것 혹은 內外通面같이 非接觸고무를 壓入한 것

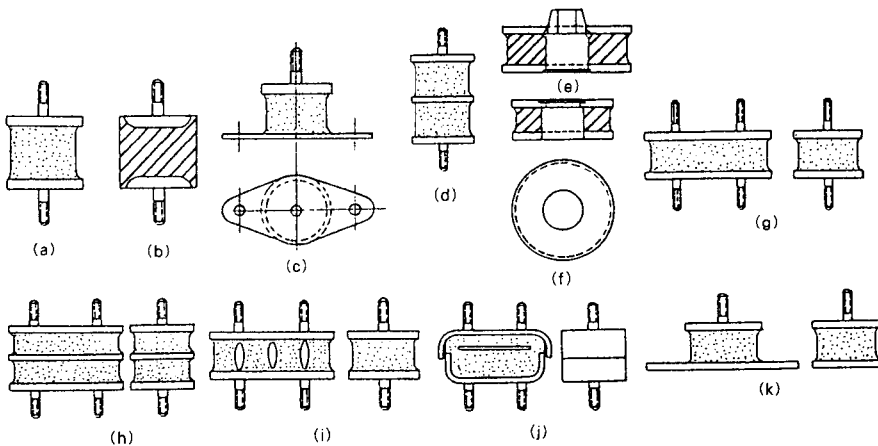


그림 2. 압축형 방진고무

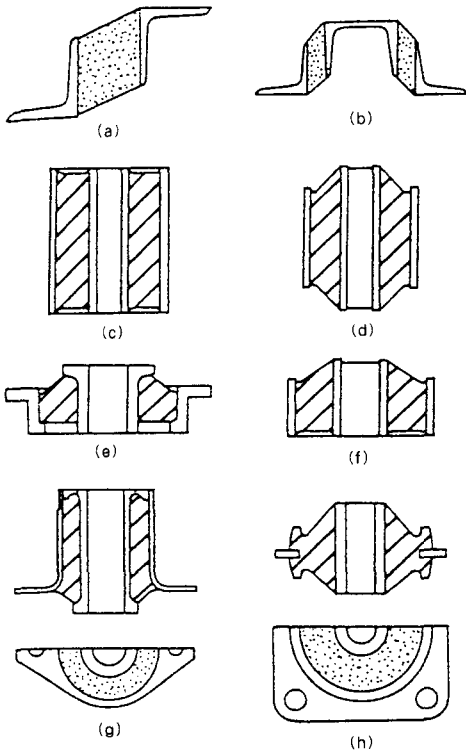


그림 3 전단형 방진고무

등 소위 壓入 type도 利用된다(壓入率의 공칭은 고무두께의 20~40%에 달함).

### 3-3. 복합형 방진고무

以上の 압축, 전단형 방진고무로 不可能한 spring 정수비를 요구하는 경우는 복합형을 사용하지 않으면 안된다. 이 형식은 압축, 전단의 양 응력이 움직이는 것이지만 될 수 있으면 간단한 형의 것을 사용하는 것이 양산상에서 유리하다.

## 4. 고무의 수명

### 4-1 고무제품의 열화와 열화현상

고무제품은 사용되는 환경에 있어서 사용조건, 기타 외부의 자극 혹은 고무 수화물의 조성등의 内部에서의 자극, 곧 物理的 化學的 원인에 자극 받아 초기에 갖고있던 기계적 性質, 外觀, 形狀등이 시간의 경과와 함께 變化하고

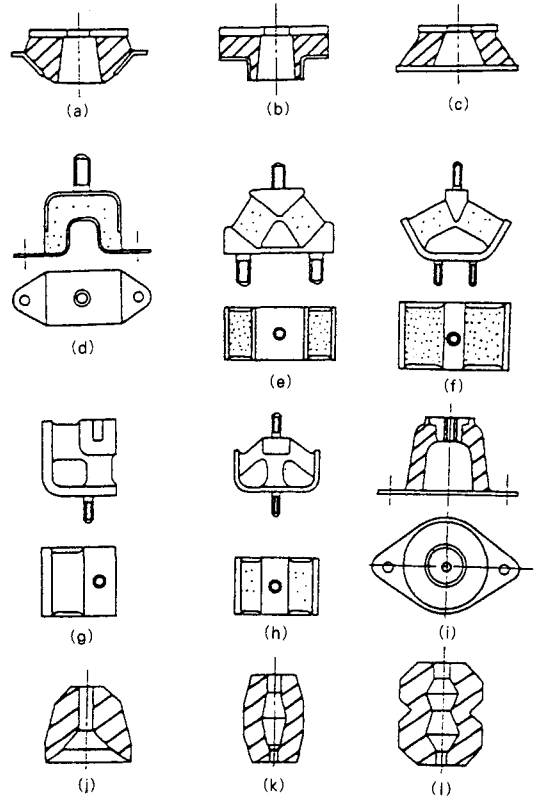


그림 4. 복합형 방진고무

實用上 그 변화가 문제로 되는 상태로 달하고 마는 狀況으로 된다. 이같은 상태를 고무의 劣化라고 부른다.

이 고무열화의 요인은 内部的으로 ① 고무 화합물의 polymer, ② 충전제, ③ 가교 형태등을 들 수 있고, 外部的으로는 ① 화학적(또는 환경요인), ② 물리적 요인(기계적 요인)을 들 수 있다. 이들은 단독으로도 作用하지만, 實際로는 이들의 요인이 여러 가지로 얽혀져 고무에 作用하고 있다. 예를 들면, 기계적 刺戟要人(하중, 진동조건등)에 대해서는 분위기중의 산소, 오존, 光등의 作用이 관여하고 또 熱도 관여한다. 이들의 요인에 의해 일어나는 現象은 粘着(가교의 절단), 硬化(가교의 진행) 혹은 균열, 갈라짐으로 나타난다.

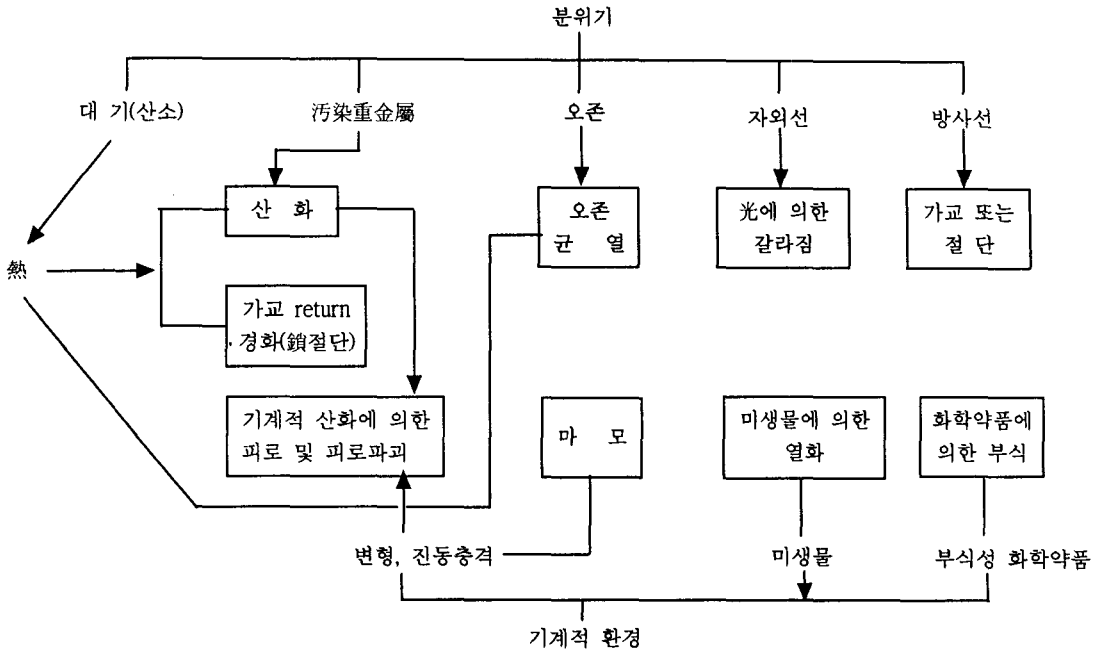


그림 5. 고무의 열화요인과 현상

#### 4-2 열(온도)과 산소의 영향

가교고무는 긴 쇠상분자중의 가교부분을 가진 거대한 3차원 구조이다. 고분자쇄, 혹은 가교부분은 대기중의 산소에 의해 산화반응을 받아 강도 기타 물성에 변화가 일어난다. 이 현상을 老化(Aging)이라고 한다.

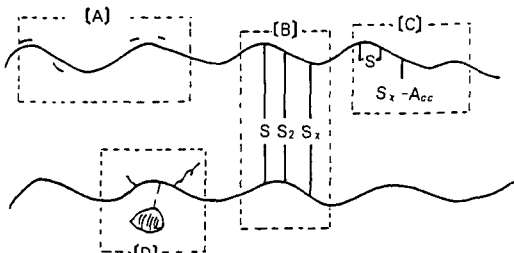
이 化學反應은 열(온도)에 의한 촉진되고 또 光 혹은 重金屬(Cu, Mn 등) ion의 촉매적 作用

에 의해 촉진시켜진다. 물(濕氣)도 산화의 촉진에 作用한다.

##### 4-2-1. 고무의 산화<sup>1)</sup>

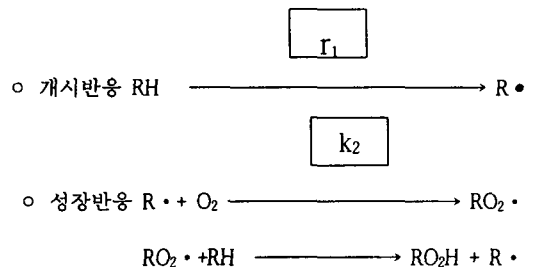
고무의 산화는 고무분자의 自動酸化反應이고 polymer의 주쇄에서 일어난다. 이 反應의 개시는 고무중의 불순물, 고무분자의 이상구조 혹은 光 등의 에너지의 자극이 라디칼의 生成을 일으키고 이에 산소가 反應하고 hydroperoxide 및 peroxide가 實質인 반응개시제로 되어 성장반응이 진행되고 peroxide 라디칼의 不活性化에 의해 반응이 끝난다.

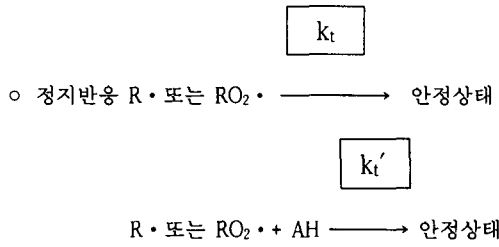
이 自動酸化反應은 다음과 같이 表示될 수 있다.



- [ A ] polymer의 주쇄
- [ B ] 가교 부분(mono, di 및 polysulfide)
- [ C ] 環化 pendent group
- [ D ] 기타 雜物質

그림 6. 유황가교의 모형





peroxide 라디칼에 의한 고무분자에서의 수소를 탈취하는 속도는 고무의 化學구조에 의해 차이가 있다. 이것이 고무의 종류에 의해 老化性能이 다른 점이다. 예를 들면 isoprene chain 를 가진 고무(NR, IR), butadiene chain를 가진 고무(SBR, BR)에 대하여 다음과 같이 볼 수 있다.

- (1) NR, IR은 주쇄절단이 주이고, 연화하고, 강도의 저하를 가져오지만, 압축영구 변형은 영향이 적다.(IIR, CO, ECO등은 이 type에 屬한다)
- BR, SBR은 가교반응이 우세하고, 경화하며, 강도의 저하는 없지만 압축영구 변형의 영향은 크다.(CR, CSM, FKM등은 이 type에 속한다)
- (2) 산소함유 패턴은 다른 경향을 갖고 있다.
- (3) NR, IR은 고온(90°C 이상)에서는 軟化現象을 나타내고 BR, SBR은 gel화(BR은 약130°C, SBR은 180°C)를 일으킨다.

(4) 酸化에 있어서 가교반응에 대하여서는 과산화물 가교에 있어서 과산화물이 참고로 될 것이다.

예를 들면 SBR 12.5, BR 10.5, NR 1.0, NBR 1.0, CR 0.5, 산소흡수량 및 탄성률 혹은 응력 변화속도 등의 물성의 변화가 網目の 붕괴의 척도로 된다. 산소흡수량과 고무의 종류 및 인장응력과의 관계를 그림 7 및 8에 나타낸다.

가교형태는 고무의 老化物性に 큰 影響을 미친다. 표 2는 가교양식에 의한 分子쇄의 절단 확율을 나타내고 있다. C-Sx-C 결합은 C-C 결합에 비해 約 400배의 속도로 절단되므로 polysulfide 결합이 산화가 현저하다는 걸 알 수 있다.

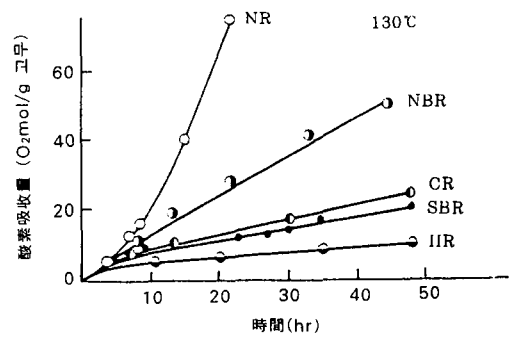


그림 7. 고무의 종류와 산소흡수

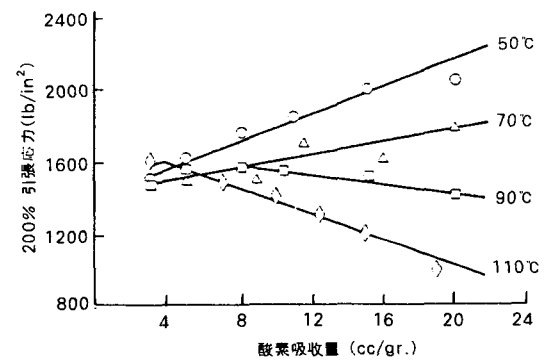


그림 8. 산소흡수와 인장응력(200%)

표 2. 가교양식과 分子절단의 確率 및 해리 에너지 관련계<sup>12</sup>

가교양식	分子절단의 확률	해리에너지 (Kcal/mole)	
S - CS	- C - SX - C -	400	27.5
TT + S	- C - S2 - C -	-	27.5
TT	- C - S - C -	200	54.5
Dicumylperoxide	- C - C -	1	62.3

이 polysulfide 결합의 不安定과 절단 용이에 대하여는

- (1) 이 결합은 용이하게 라디칼을 절단을 하고 라디칼 개시제로 되어 산화성을 증대한다.
- (2) 산화방지제의 능력을 저하한다.
- (3) S에 인접한 염소에 결합한 수소를 활성화 하고 peroxide 라디칼의 수소탈취를 도전한다는 등에 의한 것이라 생각 할 수 있다.

그림 9에 NR가교계와 산소흡착의 관계를 나타내었다.

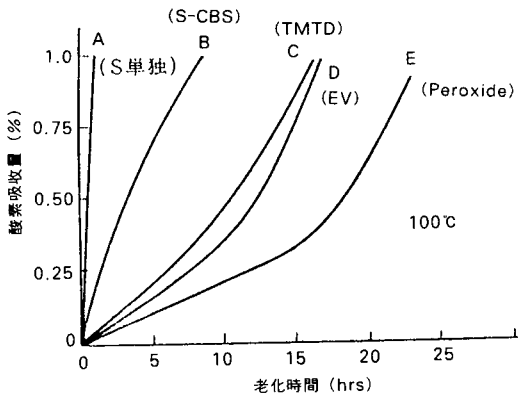


그림 9. 가교계와 산소흡착의 관계(NR)

그림 6의 (D)부의 망목결합 이외의 협잡물로는 충전제의 불순물로서 중금속의 화합물 혹은 안정제로서 노화방지제등이 있고 이들은 어느 것이라도 고무의 노화 촉진 혹은 억제에 영향을 미치므로 열화에 대하여 큰 영향이 있는 것은 말할 필요도 없다.

산화방지에서 필요한 산소는 확산에 의해 고무중에 중합된다. 실온에서는 확산속도가 적으므로 그 작용은 늦고 고무 내부에 균일하게 일어난다. 고온( $T_g$ 보다 충분히 높은 온도)에서는 확산의 활성화 에너지는 산화의 활성화 에너지에 비해 적으므로 산소가 고무속에 침투 확산

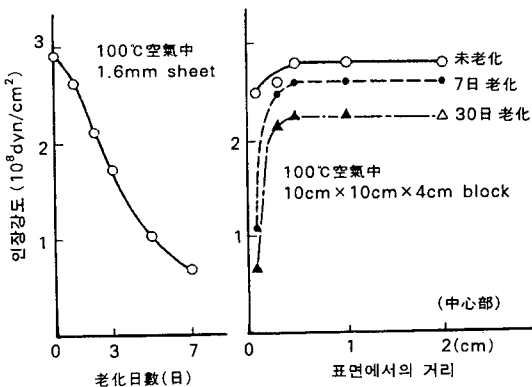


그림 10. 두께와 노화후 인장강도의 관계

의 깊이는 온도가 상승할수록 얇게되고 반응은 고무의 표면만 현저하다. 고무의 두께와 노화 후의 특성관계를 그림 10에 나타내었다.

산화는 온도에 의해 촉진되어 일반적으로 10°C 온도가 상승하면 반응속도가 2배로 된다고 말하여지고 있다. 온도가 고무특성과의 관계에 대하여는 반응속도에 관한 아레니우스식 곧

$$K = Ae^{-E/RT} \text{에서 } (\ln K_1 - \ln K_2) = -\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

로서 고무수명의 추정이 가끔 행해지고 있지만 활성화 에너지 E는 고무의 재질 또는 온도영역에 의해 변동하므로 이 적용에 대하여는 유의하지 않으면 안된다. 고무의 산화방지에 대하여는 산화기구에서 기술했듯이 hydroperoxide 라디칼에서 발단하고 고무 라디칼 등의 안정화로 끝나므로 이들은 포착하기 쉬운 것 또는 라디칼 수용능력을 가진 것 등이 유효하다. 노화방지제로써는 전기의 기능을 가진 방향족 amine계, thio urea계의 전도체가 유효하고 이들의 화합물이 사용되고 있다.

#### 4-2-2. 내열성 (고온에 있어서의 문제)

고무의 고온에서의 거동은 ① 고무의 열분해 또는 연소분해를 일으키는 특히 높은 고온도 영역의 현상, ② 기계적 강도가 다소라도 유지되고있는 온도영역(200~300°C)으로 나누어 생각하지 않으면 안된다. 고무의 열에 의한 분해에 대해서는 고무의 화학구조에 있어서 원자간 동지의 결합, 해리 에너지와의 관계에서 고찰이 행해지고 있다. 열분해는 사용 조건(예를 들면 반복진동, 큰변형진폭 등)에 의해 내부의 발열에 의한 경우도 있다.

표 3. 고무에 기포가 발생하는 온도<sup>13)</sup>

	고무배합	tread 배합
SBR (Buna s)	254°C	233°C
NBR	284°C	233~244°C
CR (Neoprene GN)	227°C	233°C
NR (Hevea)	198°C	198°C

\* 고무를 액중에 침적하고 온도를 올려서 고무에서 기체가 발생하는 온도

고무의 분해온도를 표 3에 나타내었다. 일반적으로 내열성을 말하는 경우는 앞의 ②의 경우이다. 고무제품은 그 사용되는 조건이 고온에서 단시간 사용인 경우 또는 고온에서 비교적 장시간 사용되는 고무도 있고 그 내열성에 대해 고찰할 때에는 단지 고무재질의 열에 대한 점만 아니라 고무의 열에 의한 산화도 고려할 필요가 있다.

고무의 고온에서 중시할 점은, ① 고온에서 기계적 강도, ② 가열변형이다. -- 예로써 고온 단시간의 고무의 사용온도를 보면

표 4. 고무의 고온한계<sup>14</sup>

	8hr 가열해서 T <sub>b</sub> <sup>1)</sup> 25% 저하온도(°C)	c.f. Carlotta & Hobein Rubber Age(N. Y)74, 85(1953) (°C)
Silicon Rubber	249	277
Acryl Rubber	218	199
NBR	171	171
CR	163	157
IIR	168	149
SBR	135	138
NR	99	127
Thiokol	141	121

1) T<sub>b</sub>: 인장강도

#### 4-2-3. 빛의 작용

광은 고무의 표면에 있어서 우선 망목의 절단을 일으키고 점착, 경화를 일으키고 소위 crazing현상을 일으킨다. 이 현상에 의한 열은 방향성이 없고, 오존균열과 구별된다.

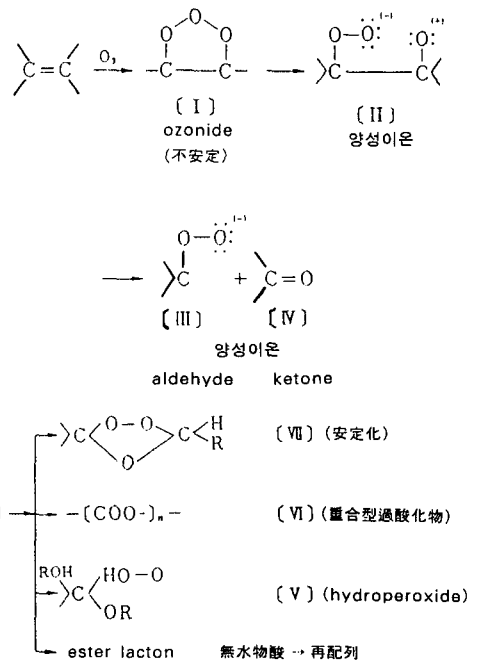
#### 4-3. 오존의 작용<sup>2</sup>

대기 중에는 ppm 정도의 미량의 오존이 포함되어 있다. 이 오존은, ①성층권에서 생성한 것이 지표까지 도달한 것, ②자동차의 배기가스에 의해 발생하는 NOX의 광화학 반응에 의해 생성한 것, ③전기 기기 등 고전압이 발생하는 경우도 발생한다는 것이다.

오존의 고무에 대한 작용은 고무의 표면에

국부적인 균열 생성의 현상이고, 고무가 응력을 받아 신장된 상태에 있어서만, 응력방향의 직각에 열이 발생한다. 이 작용은 고무의 피로 파괴에 있어서 중요한 역할을 한다.

전향의 산화는 고무의 전체적 성능의 변화에 관한 것이 많지만, 오존에 의한 열은 표면에만 局部的 현상이다. 오존은 고무표면의 이중결합에 빠르게 반응하고 내부에 침투한다. 그 반응 기구는 다음과 같이 표시된다.



오존의 작용은 고무의 표면만이고 未伸張의 경우는 오존의 확산속도에 支配되어, 그 침투하는 깊이는 오존에 폭로 되어있는 시간의 평방근에 거의 비례하여 증가한다. 신장된 고무의 경우에 고무 이중결합에 오존공격에 의해 분자의 절단이 늘어나 "연화 또는 수지화현상"; 절단된 주위분자에 응력의 확산이 행해져, 확산에 의해 오존은 내부로 침투하고 균열은 차츰 크게 되어간다. 균열이 개시하는 장소는 표면에 응력집중을 일으키는 상처, 예를 들면



금형의 사상에 의한 상처, 기포, 충전제들이다. 이 균열은 응력(변형)이 한계치를 넘지 않는 한 일어나지 않는다. 일단 균열이 일어나면 균열의 성장은 동시에 의존하고 그 성장속도는 고무응력의 함수이지만, 하나의 상처보다는 다수의 상처일 경우 늦게 된다.

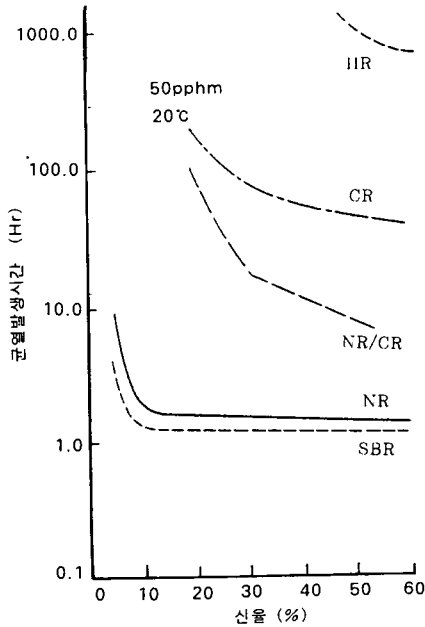


그림 11. 균열발생시간과 신율

또한 균열성장속도는,  $T_g$  이상의 온도에는 분위기중의 오존 농도에 비례한다. 균열발생시간과 신율의 관계를 그림 11에 균열발생시간과 오존의 관계를 그림 12에 나타내었다. 균열의 수와 신율의 관계를 그림 13에, 응력과의 관계를 그림 14에 표시했다.

균열 성장속도는 polymer의 종류, 온도에 의해 다르다.

오존 균열은 전기의 요인 외에도日光, 온도, 또는 진동조건 등도 관여한다. 오존균열방지에는 고무표면에 보호피막을 만드는 wax의 사용, 오존 열화제의 사용 혹은 내오존성이 있는 polymer blend 등의 방법이 행해지고 있다.

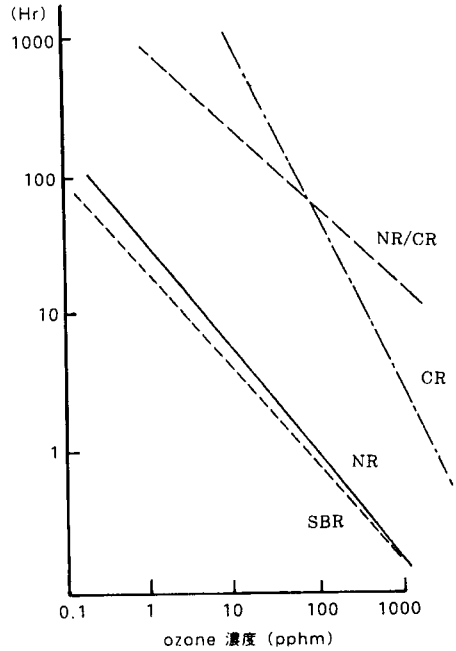


그림 12. 균열발생시간과 오존의 농도

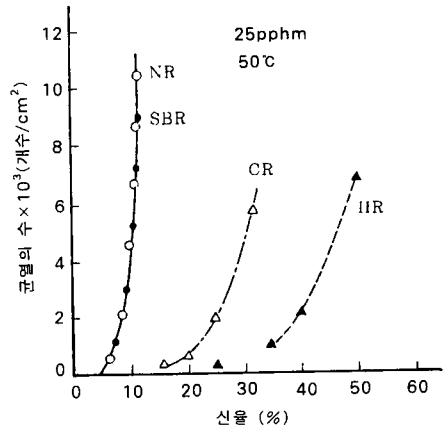


그림 13. 균열의 수와 신율

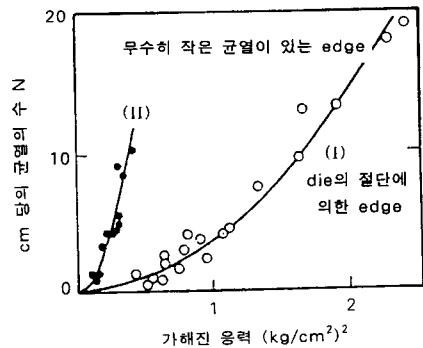


그림 14. 균열의 수 응력

표 5. 各種 polymer의 균열 성장속도<sup>15</sup>

polymer	균열성장속도(mm/min)		
	2℃	20℃	50℃
NR	0.15	0.22	0.19
SBR(75/25 Batadine styrene)	0.13	0.37	0.34
IR(Polysar 400)	-	0.02	0.16
NBR(60/40 butadiene nitrile)	0.004	0.04	0.23
NBR(70/30 " " )	-	0.055	-
NBR(82/18 " " )	-	0.22	-
CR(Neoprene GN)	-	0.01	-

(注) 오존농도 1.15mg/ℓ

#### 4-4. 油 및 화학약품의 작용<sup>3</sup>

고무는 油(특히 광물유) 및 유기용제(탄화수소)에 의해 팽윤하지만, 가교고무의 경우 팽윤은 網目구조에 직접적인 작용은 없고 특성의 低下를 갖고 온다. 팽윤의 과정은 확산에 의해 진행되고 일정한 조건하(油, 온도 등)에서는 평형 팽윤에 달한다. 이 평형 팽윤은 고무의 종류, 가교의 정도, 액체의 성질로 크게 변하고 또 고무의 변형의 상태도 영향이 있다. 내유성이 요망되는 제품에 대해서는 내유성고무의 사용이 바람직하지만, 제품의 형상, 기타 설계에 따라서 非耐油性 고무도 사용된다. 곧 고무가 기름을 흡수하는 정도(고무의 표면에서 침투하는 깊이)에 의해 수명이 결정되므로 반응속도와 기름의 성질을 고려하여 형상을 설계하는데 따라 가능하다는 것이다.

온도는 확산속도를 빠르게 함과 함께 열에 의한 노화를 동반한다. 화학약품에 의한 노화는 고무에 확산 대한 약품의 화학반응이 동반되므로 아주 복잡하고 각각의 경우에 따라 고려하는 외에 수단은 없다. 고무의 耐水性은, 기름과 같이 확산에 의해 지배되지만 흡수되는 속도는 아주 늦다. 재료에 따라서 가수분해를 일으키는 것이 있으므로 유의해야 한다.

#### 4-5. 靜的應力에 의한 變化(Creep과 應力緩和)<sup>4</sup>

고무에 일정한 응력이 작용하는 경우의 現象

으로 응력이 가혹하게 되면 궁극적으로 破壞에 도달한다. 차량용 mount類, 자동차용 engine mount類 같은 제품에 대하여는 특히 중요하고, 고무의 數值, 형상 등의 변화를 일으켜 제품의 수명을 좌우한다. Creep 현상은 응력(변형)의 크기, 온도, 재료의 성질에 따라 다르다. Creep 현상은 應力緩和의 현상과 밀접한 관계가 있다. 이 현상은 물리적효과와 화학적효과의 2가지 성분이 있다. 물리적효과(緩和 또는 Creep)는 비교적 단시간의 경우로 고무분자의 유동성, 고무의 resilience, 내부점성 등이 관련하고 있고, 고무狀 물질의 완만한 粘性流動 현상이고 온도는 별로 관계없이 負荷후의 시간에 거의 비례한다. 또 가교의 정도에 관계한다. 화학적효과(緩和 또는 Creep)는, 가교부 또는 主鎖의 절단이고 시간과 함께 현저히 변화하는 산화반응이 주체이고, 온도에 의해 촉진된다. 이 변화는 10℃에 2.5배 증가한다. 산화반응이므로 그 반응은 확산에 의해 지배되므로 제품의 두께에 관계가 있다. 특히 고온에서의 작용에 대해서는 고무수치가 설계상의 중요한 문제로 된다. Creep또는 응력緩和는 부하된 하중(응력또는 변형)을 제거하면 본래로 회복되지만 이 회복은 시간에 의존하지만 회복하지 않는 부분이 남는다. 이것이 영구변형이다.

#### 4-6. 고무의 피로<sup>5</sup>

고무의 피로는, 고무제품의 사용중 응력의 반복조건하에서, 제품이 사용불능으로 진행되는 변화, 곧 성능의 저하 혹은 파괴이다.

##### 4-6-1. 피로 (피로현상과 피로파괴)

고무에 반복응력 또는 변형을 부여한 경우 시험조건, 재질에 의해 피로의 과정은 다르지만, 특성은 거의 일정경향을 갖고 변화한다. 그림 15에 충전제를 포함한 가교고무의 경우 반복수와 비틀림 모멘트 진폭의 관계를 나타냈다. 충전제를 포함하지 않는 고무의 경우 비틀림 모멘트진폭은 거의 변화하지 않는다. 충전제를 포함한 경우는 어떤 反復數까지는 거의

直線으로 변화하고(감소하고) 거의 일정치를 잠시 유지를 계속한 뒤 龜裂의 발생에 이른다. 탄성률(비틀림 Moment진폭)이 거의 직선으로 저하하는 경향은 실험의 온도범위(40°C~90°C)에는 온도에 거의 영향을 주지 않고 진동수에 거의 비례하여 증대하고 비틀림 모멘트진폭의 자승에 거의 비례하는 결과가 얻어진다.

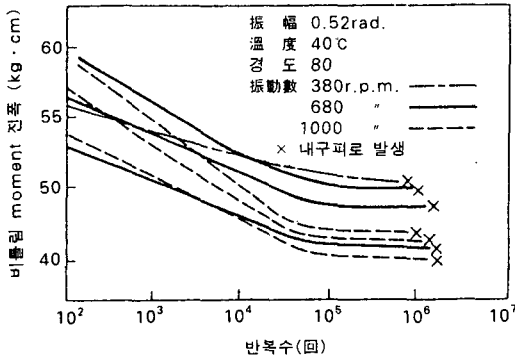


그림 15. 비틀림 모멘트 振幅과 反復數

피로과정은 따로 3가지의 단계로 대별할 수 있다.

第 1 段階 : 負荷開始 직후의 응력, strain(변형)의 급격히 저하하는 시기(初期段階: 경화현상 또는 응력경화현상). 純고무에는 거의 일어나지 않는다. 약한 결합, 고무 분자간의 應集결합의 절단등이 일어난다. 응력 혹은 振動依存性이 인정되지만, 반복을 중지하면 회복한다.

第 2 段階 : 응력 혹은 strain(변형)의 변화가 완만한 기간이고, 고무표면 혹은 내부에 파괴의 핵이 생성하는 기간(온도가 별로 높지 않는 때는 경화현상). 물리결합의 변화, 산화에 의한 분자쇄의 절단 및 가교, 유허가교의 변화, 고무와 충전입자, 표면의 응집결과 변화, 충전제의 재분산결합 등의 재질내부의 구조변화가 일어난다.

第 3 段階 : 파괴의 핵이 성장하고, 龜裂이 認定되고 뒤이어 전체가 파괴에 이르는 기간(파괴현상, 피로현상). 파괴의 핵이 집중 응력을 받아 성장하고 파괴에 이른다. 시료의 형상(극부변형)이 크게 영향을 받는다. 피로현상은 상

기의 3가지로 나누지만 제 1, 2 단계를 합친(연화현상-응력경화현상-과경화현상) 현상이 있다고 생각되고 있다. 이 현상에 있어서 재질의 변화, 곧 고무, 충전제, 복합체의 구조변화, 불균질구조로서 물성면에 나타난다.

물성면에 나타나는 것은 ①국소진폭에서의 동적탄성률 및 진폭의존성의 減少, ②역학적 손실계수의 減少, ③膨潤綱目の 농도 및 고신장 modulus의 증가, ④안정한 황결합, 열안정성의 증가, ⑤각종 파괴강도의 저하 등을 들 수 있다.

피로현상에서 초기단계에는 유전의 증지에 의해 특성이 어느 정도 회복하지만 완전히는 회복하지 않는다. 피로현상에 미치는 요인으로써, polymer의 종류, 충전제의 종류와 양, 가교제 및 가교조건, 경화제, 가교제, 노화방지제 및 고무의 조건 등을 들 수 있다. 또한 시험조건도 하나의 요인이다. 피로파괴는, 피로과정중의 제 2 단계 중에서 제 3 단계의 마지막까지 현상이라고 보아도 좋다. 고무 표면의 상처, 오존에 의한 龜裂 혹은 구조변화에 의해 파괴의 핵이 생성하고 龜裂의 끝부분에 응력의 집중이 일어나 고무의 龜裂이 성장하고 고무의 파괴에 이르는 현상이다.

#### 4-6-2. 破 壞

파괴는 고무가 반복변형을 (혹은 응력) 받고 있는 과정에서 고무가 받는 변형응력이 고무가 갖고 있는 극한의 신율, 혹은 응력을 국부적으로 넘는 점에서 시작, 파괴에 이르는 과정이다.

이 피로파괴의 개시점은 고무의 표면 혹은 내부의 불균일이다. 곧 금형의 흠, 고무재질중에 포함된 여러 가지 물질의 고착, 오존에 의한 龜裂, 사용중에 생긴 흠, 혹은 전 절에 기술한 구조변화도 포함될 것이다. 이들의 龜裂이 반복중에 진행해 가는 과정은, 고무의 재질, 사용조건, 환경조건에 의해 다르지만, 龜裂의 성장과정은 단속적인 인열과정이라고 볼 수 있다.

(1) 인열 및 그 성장속도와 피로파괴의 關聯  
고무의 인열 에너지는

$$T = 2KWc \dots\dots\dots (4-1 \text{ 식})$$

T : 인열 에너지 (龜裂성장의 단위면적에 방출된 변형에너지)

W : 시험중의 변형에너지 密度

C : 龜裂의 크기

K : 정수(strain의 함수, strain이 적을 때  $K \approx \pi$ ,

$$\text{strain이 클 때 } K \approx \pi / \lambda^{\frac{1}{2}})$$

이 인열 에너지 T는 재료의 hysteresis의 크기에 지배된다.

NR에는 대변형이 있을 때 뛰어난 탄성을 나타내고, 신율이 클 때 결정화에 의해 높은 hysteresis를 나타내므로 耐龜裂 成長성이 있고, SBR에는 비결정성이기 때문에 hysteresis가 적으므로 耐龜裂 成長성이 적다. 龜裂成長開始에 필요한 한계 에너지  $T_0$ 는 hysteresis에 무한계이고 일차결합의 크기와, 가교(황)물의 구조에 의해 지배되어 지고, 고무의 종류에 의해 크게 차는 없다.  $T_0$ 는  $T_0 = b.D.c \cdot \sqrt{u}$ , ( $b$  : 체적당 단일결합의 수,  $c$  : 단위 모너머 분자의 길이,  $D$  : 각 단일결합에 의해 축적된 에너지,  $u$  : 가교간의 단위 모너머 수보다 근이적이다. NR에는 약  $4 \times 10^{-4} \text{ erg/cm}^2$ 의 흠 혹은 균열을 갖고 있는 고무를 늘이면 균열끝의 응력은  $T_0$ 에 달할 때까지 신장시의 stress-strain 곡선에 따라 증가하고 더 신장이 누적되면 균열은 성장하고 龜裂의 끝주변의 고도로 strain의 어떤 부분에 변화를 일으켜 다시 새롭게 형성된 龜裂 끝의 응력은 재료의 hysteresis에 영향을 받는다. Hysteresis가 크게 되면 꽤 에너지손실이 있으므로 龜裂의 진행은 저해된다.  $T_0$  이상의 영역에는 龜裂의 성장속도는 인열 에너지와 직선적으로 증가한다.

반복변형을 받고 있는 龜裂의 성장은

$$dc / dn = BT^\beta \dots\dots\dots (4-2)$$

여기에  $c$  : 龜裂의 길이  $n$  : 반복수  
T : 인열 에너지  
B : 정 수  
 $\beta$  : 정 수(hysteresis 가 적은 고무는 크게 된다 NR  $\approx 2$ , SBR  $\approx 4$ )로 표현된다.

龜裂의 성장속도 ( $dc / dn$ )와 인열 에너지 T와의 관계를 그림 16에 나타냈다.

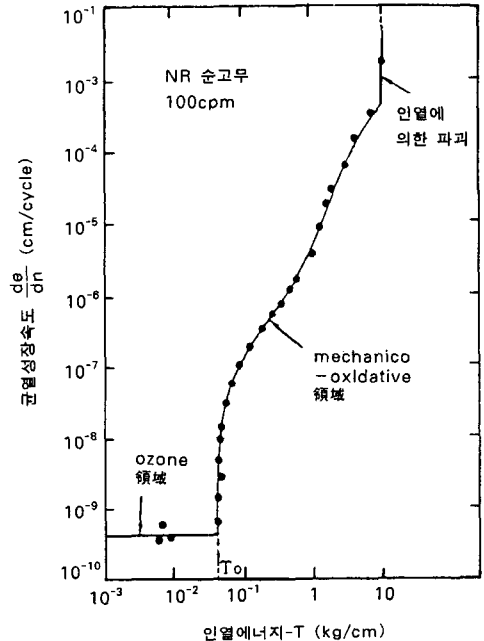


그림 16. 균열성장속도와 인열에너지의 관계

피로파괴까지(혹은 수명)의 반복수를 N으로 하면,

$$N = 1/(\beta - 1) B(2KW)^\beta C_0^{(\beta-1)} \dots\dots\dots (4-3)$$

여기서  $C_0$ 는 처음부터 어떤 흠의 유효 크기로 표현된다. 최대 strain에서 2KW와 N의 관계를 그림 17에 표시했다. 인열 에너지 T는 시험조건(온도, 인열속도) 및 재질에 관계하지만 시험편에는 無關係이다.

(2) 疲勞破壞에 관여하는 요인

a) 파괴의 開始源

피로파괴의 원인으로 되는 흠(상처)은, 이미

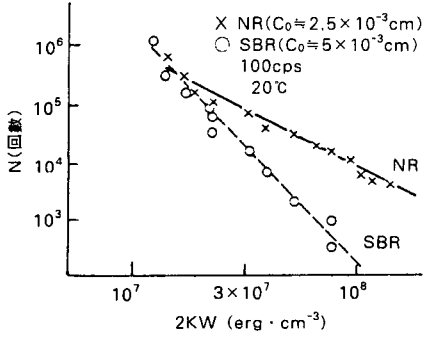


그림 17. 최대변형에서 2KW와 N의 관계

기술한 바와 같이 고무의 표면 및 내부의 균일 성이지만, 최초로 좌우하고 있는 (흠)상처의 크기를 알면 피로수명의 推定은 (4-3)식의 관계에서 추정된다. 금형의 표면에 의한 고무제품의 흠의 크기는  $10^{-3}$ cm이고, NR 중의 먼지(입자)

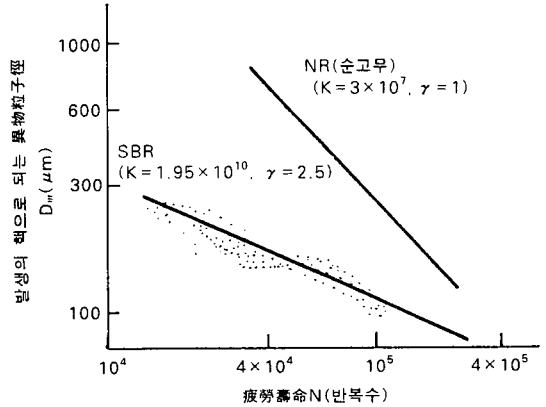


그림 19. 異物粒子徑과 수명

b) 반복 strain(변형)의 영향

(4-1) 식에 있어서, 龜裂성장을 시작하기 때 문에 필요한 최소 인열 에너지  $T_0$ 는 단순신장의 경우에는

$$T_0 / C_0 = (2KW) e_0 \dots\dots\dots(4-4 \text{ 식})$$

여기에  $e_0$ 는 疲勞限界 (最少)에 對應하는 인장 변형한계 strain (변형)이다. 실험에 의하면, NR의 순고무 배합에는  $e_0$ 는 약 75%이라 한다. 한계변형이상의 strain에 의해 龜裂은 성장하는 것이다. 변형의 영향에는 변형진폭의 영향과 최소strain (인장압축을 생각해 넣은 방향의 변동하는 strain 성분의 최소한 것을 의미함) 그림 20에 strain진폭과 피로수명의 관계를 나타냈다. 최소변형(strain)의 영역을 정리하면, ① 최소 strain이 압축측에 移動하면, 수명은 증가하고 이 증가의 경향은 고무의 재료에 관계가 없는 것이다. 그러나 압축변형이 크게 되면 그림 21에 표시한 바 같이 제품의 형상에(시험편), 크기에 도 의하지만 주름(접합)이 발생하고, 주름(접합)에 의한 균열의 발생, 고무의 점착의 문제가 생긴다고 생각된다.

② 최소 strain이 인장측으로 이동하면 수명이 증가하는 것과 감소하는 것이 있다.

③ 인장측에서 수명이 증가하는 것 중에서 수명이 일단 저하한 후 최소치를 갖고, 뒤이어

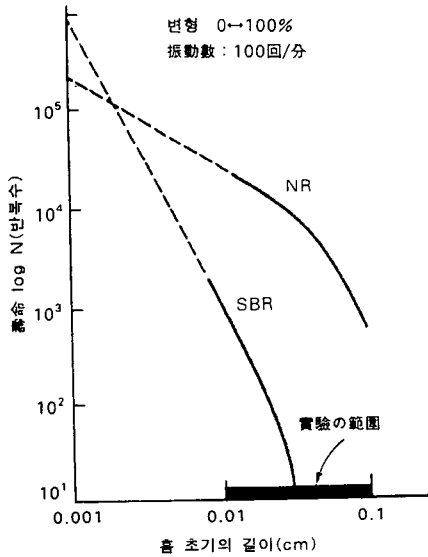


그림 18. 흠의 크기와 수명

의 크기는  $10^{-2}$ cm에 달하는 것도 있지만 대체로  $10^{-2}$ cm이상이다. 고무에 붙은 흠의 크기 또는 고무중의 異物粒子徑과 피로수명과의 관계를 그림 18 및 19에 나타냈다.

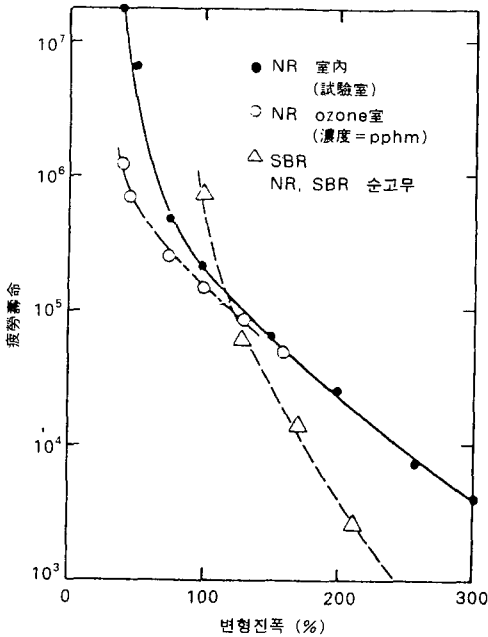


그림 20. 피로수명의 strain 진폭의존성

증가 하는 경향을 보인다. 이것은 고무의 영구 변형의 영향이 나타나고 있는 것이라고 볼 수 있다.

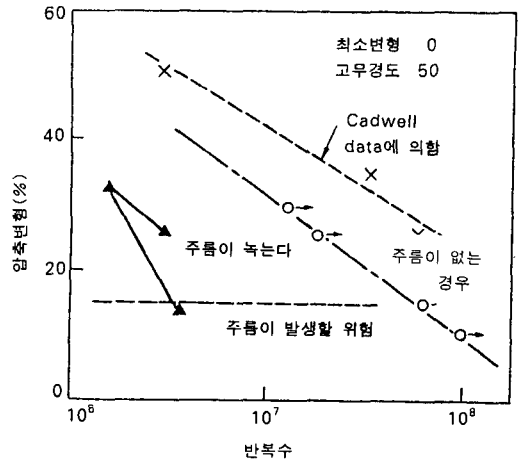
c) 온도의 영향

온도는, 변화 기타의 반응을 촉진시키므로 피로수명에 영향을 준다. 온도의 영향을 그림 22에 나타냈다.

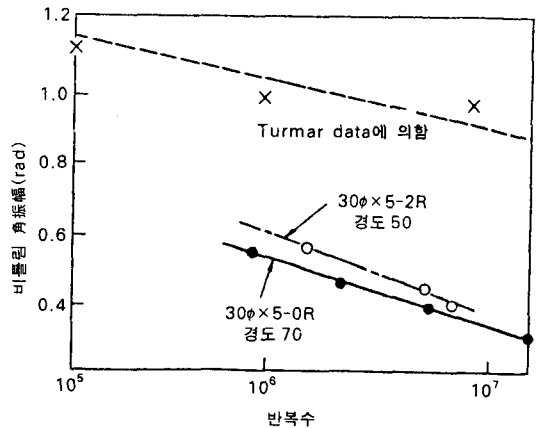
NR은 100℃까지 그렇게 변화는 없지만, SBR은 온도에 따라 꽤 수명의 저하가 있다.

d) 분위기의 영향

고무제품이 사용되고 있는 곳은 대기중이고 산소와 빛, 혹은 오존의 영향을 받는 것은 피할 수 없다. 산소 및 빛의 영향은 고무전체 성능 및 표면의 균열의 현상으로서 피로파괴의 원인 및 촉진에 관여한다. 오존은 고무표면에 직접적으로 균열을 발생시키므로 피로파괴로써는 아주 중요한 인자이다. Strain 및 오존에 폭로한 시간과 피로수명의 관계를 그림 23에 표시했다. 수%의 strain에서 수명이 최소치를 나타내고 있다. 또 그림 20에는 8pphm 오존분위 기중에서의 결과를 나타내고 있다. 오존의



(a) 압축변형 소수명 곡선(NR)



(b) 비틀림 疲勞曲線(NR)

그림 21. 피로수명곡선의 예

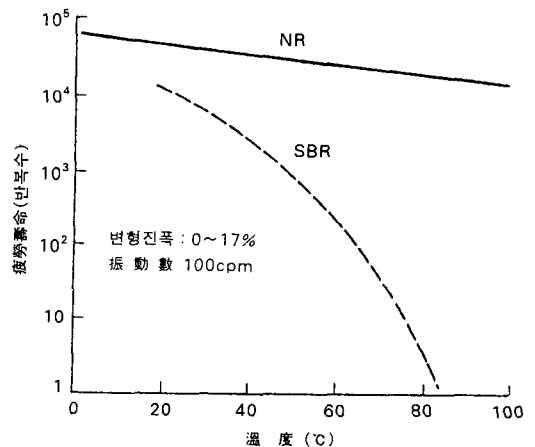


그림 22. 온도와 피로수명

영향은 약 75% 신장이상에는 거의 오존의 영향이 없어지고 있는 것을 나타내고 있다. ((4-4) 식  $e_0 \approx 75\%$  상기)

e) 고무재료의 영향

피로현상과 같이 고무의 종류, 가교제의 가교의 정도, 충전제의 종류 및 양, 노화방지제 등이 영향을 미친다. — 例로써는 충전제의 경우, 입자경의 영향외에 분산 혹은 polymer 분자와의 결합 및 반복조건하에서 구조의 변화 등에 의해서 피로수명에 영향을 줄 것이다. 충전제의 양과 수명과의 결과를 그림 23에 표시했다.

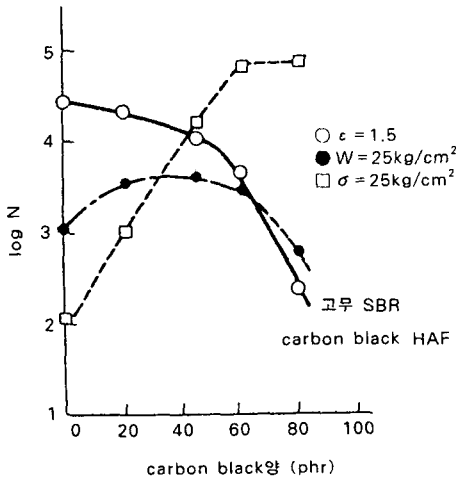


그림 23. 충전제와 수명의 관계

또 이 그림에서는 시험조건(strain, 응력, 입력에너지)에 의한 피로수명의 결과의 영향을 나타내고 있다.

f) 고무의 形狀率, 其他

압축 혹은 전단에 사용되는 제품의 경우에는 고무의 형상 및 고무부의 형상, 특히 접촉부의 피해를 반경 등이 피로수명에 커다란 관계가 있다.

고무를 압축하면 주름이 발생한다. 25%이상의 압축이 가해지면 어떤 형상에도 주름이 발생한다. 주름의 발생은 균열의 생성 혹은 마찰에 의한 고무의 점착이 일어나므로 피로수명에

크게 영향을 미친다.

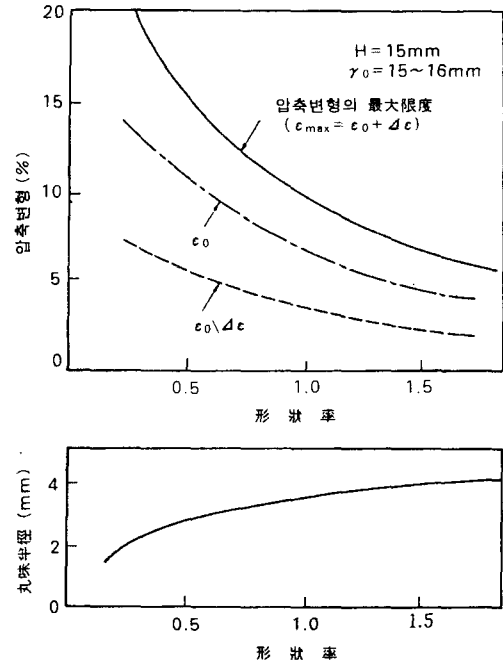


그림 24. 壓縮

고무에 가해지는 변형은, 한방향( 예를 들면 압축)이라도 제품은 어떤 형상을 갖고 있으므로 그 표면에는 축방향과 주방향의 두 성분의 집중 strain이 나타난다. 이 집중 strain은 반복 strain의 영향으로 나타난다고 기대된다.

원주상 시편에 대한 一 例를 그림 26에 나타냈다.

(3) 피로수명 향상에 대한 고찰

지금까지 피로현상 및 피로파괴에 대하여 기술했다만 피로수명의 향상을 위해서 몇가지의 수단을 기술한다. 고무제품이 사용되고 있는 분위기의 영향을 배제하기 위해서는 고무재료를 이들의 분위기에 견디도록 설계할 필요가 있다. 그리고 제작상 표면 혹은 그 가까이에 흠(상처)이 생기지 않도록 금형의 사상면의 정도향상 보호를 함과 동시에, 고무混合物의 분산의 균일화, 기포의 발생이 생기지 않도록 유

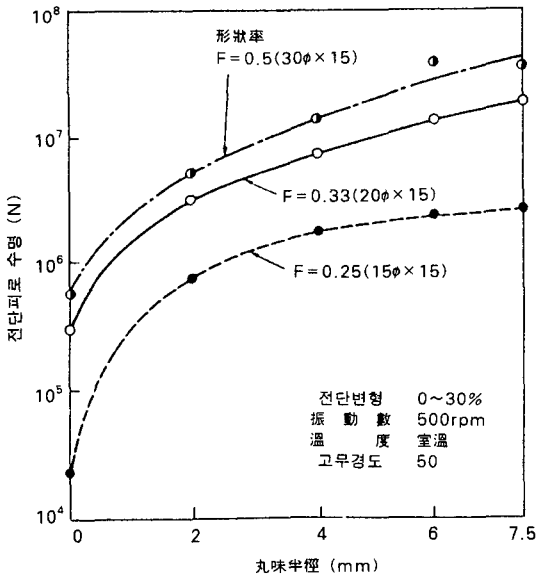


그림 25. 전 단

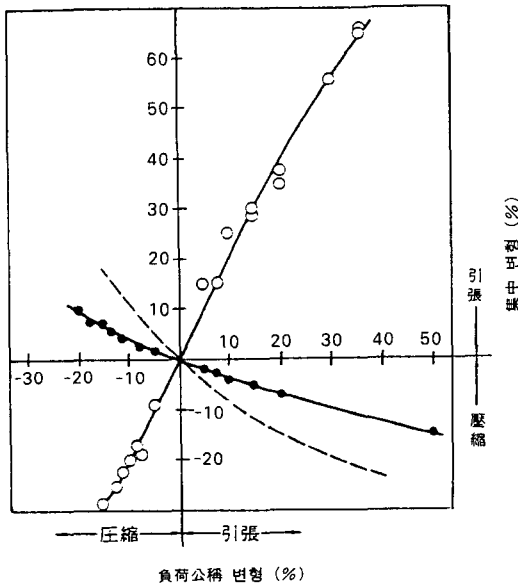


그림 26. 원주서편의 집중strain

의하지 않으면 안된다. 제품의 설계에 있어서 고무부분에 대한 응력 및 접촉부에 있어서 응

력의 집중을 피하도록 해야한다. 또 압축이나 전단에 사용되는 제품은 최소 strain이 0%근방을 될 수 있는 한 피하기 위하여 예비부하를 주는 것이 바람직하다. 허용 strain (허용응력)을 표 6에 표시한다.

표 6. 방진고무 피로수명을 고려한 경우의 기준 (福田:방진고무 피로에 관한 研究, 昭36)

	10 <sup>7</sup> 회의 수명기대	10 <sup>8</sup> 회의 수명기대
인 장	15% 이상	10% 이상
압 축	15% "	10% "
전 단	25% "	10% "
비틀림	35% "	20% "

NR을 사용한 고무 spring에 대하여 경험적이지만 설계의 지침을 보면 탄성률 100lb / in<sup>2</sup> (약 7kg/cm<sup>2</sup>)의 천연고무에 대하여 ① 전단 사용의 때 예비부하(압축)의 양에 대한 안전한 응력의 범위는 그림 27과 같고 예비압축의 정도는 형상에 크게 관계한다.

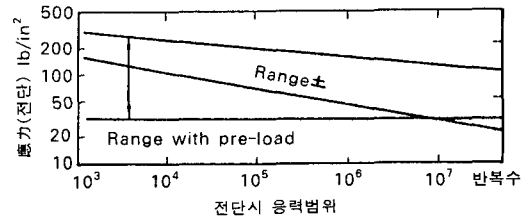


그림 27. 예비부하의 양에 대한 안전한 응력 범위

② 접촉면의 應力분포가 꽤 균일한 경우의 비틀림 전단 사용때는 1.5 배의 큰 응력이 허용된다.

③ 신뢰성이 그렇게 중요하지 않는 제품에 대해서 50%의 큰 압력범위가 허용되지만 신뢰성을 요하는 제품에는 25%정도 적은 압력범위 지 않으면 안된다.

④ 온도가 높게 되면 허용압력범위는 낮게 되지만 비교적 단시간이던가 혹은 아주 긴시간이던가에 대한 한계에는 큰 차이가 있다.



⑤ 탄성률이 100lb/in<sup>2</sup>(약 7kg/cm<sup>2</sup>)이 아닌 때는 압력범위는 그림 28에 표시한 대로 되지만, 60~250lb/in<sup>2</sup>(약 4~17kg/cm<sup>2</sup>)의 사이에 있는 것이 바람직하다.

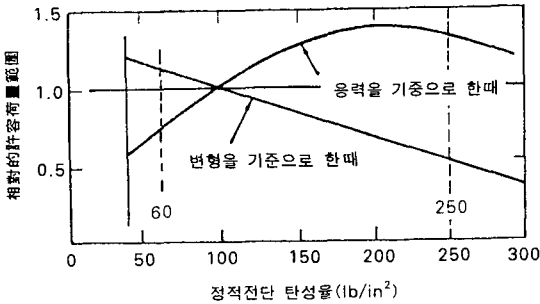


그림 28. 탄성율에 따른 상대적 허용하중 범위

4-6-3. 内部 파괴 (發熱에 의한 문제)

고무에 반복하중을 가하면, 진동수가 높든가, 변형(응력)이 클때든가, 제품의 부피가 큰 때에는 고무의 점탄성적 성질(내부손실)에 의해 발열하고 열이 축적되어 내부가 고온에 의해 내부에서 파괴하는 현상이 일어난다. 본질에서 기술한 피로현상, 피로파괴와는 별개의 것이지만 실제로 가끔씩 일어나는 문제이다.

고무같은 준선형 점탄성체에는(압력 - Strain 이 타원으로 표시되는 경우) 1 cycle당 단위 체적의 고무 발열량  $\Delta W$ 는 다음식에 부여 된다.

$$\Delta W = \pi G_2 \gamma_0^2 = \pi J_2 \sigma_0^2 = \pi \sin \alpha E / 2$$

.....(4-5 식)

- $G_2$  = 손실탄성률
- $J_2$  = 損失
- $\alpha$  = 손실각
- $\gamma_0$  = Strain 진폭
- $\sigma_0$  = 응력 진폭
- $E$  = 入力 에너지 ( $\approx 2\gamma \gamma_0 \sigma_0$ 로써)

일정 Strain 진폭에서 행해진 결과를 그림 29에 나타내었다.

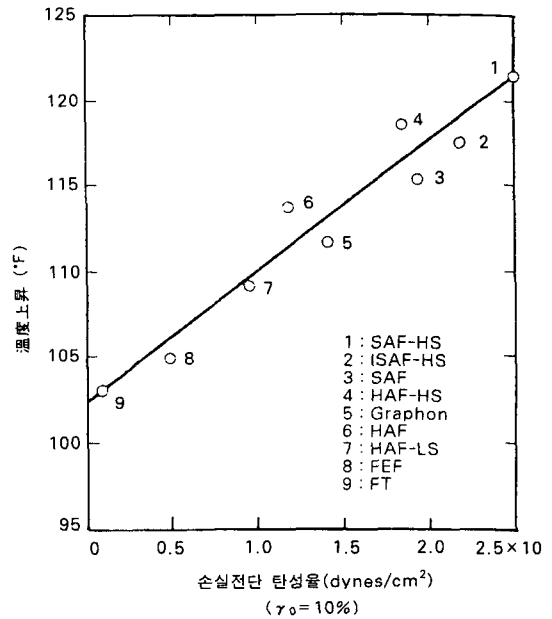


그림 29. 손실전단 탄성율에 따른 온도상승

5. 방진고무의 제작

방진고무는 그 제작기술에서 설계면, 실용면이 제약되고 있는 것이 많이 있다. 기술의 진보에 의해 이들의 제약은 점점 해소되고 있지만, 역으로 제작의 知識을 충분히 갖지 않고 이를 설계하면 cost up을 조장할 뿐만 아니라 제작의 곤란한 형상, 위치를 선택하게 된다. 방진고무의 대부분이 고무와 金具로 구성되어 있고 또 대부분이 금형을 사용하여 제작하는 型製品이다.

본 절에서는 재료와 가공방법 등을 공정순으로 설명한다.

5-1. 고무재료

방진고무의 원료고무는 요구되는 사용목적, 특성 등에 의해 혹은 가공공정의 난이도에 의해 NR, 합성고무 혹은 이들의 블렌드 물이 이용된다.

○ 일반적인 곳에는 다음과 같은 고무가 사용되고 있다.

NR	EPDM
SBR	NBR
BR	URETHANE 고무
IIR	NORSOREX

- 특히 내유성이 요구될 때 : NBR
- 내후성 및 가벼운(輕度) 내유성을 요구될 때 : CR
- 특히 큰 진동력 減衰能을 요구되는 방진고무 : IIR
- 내열성을 요구하는 방진고무 : EPDM
- 특히 고탄성을 요구하는 때 : Urethane 고무
- 특히 낮은 spring 정수를 요구하고 또 輕量을 요구할 때 : Urethane Sponge를 사용하는 경우도 있다.

이상의 예는 요구도가 높은 경우의 사용 예이고, 예를들면 油中이든가 油가 걸리는 상태에는 NBR을 사용하지만 油의 분위기정도의 현상에서는 NR이라도 충분하다. 또 고온시의 특성을 중시하여 EPDM을 사용하면, 고온시의 강도가 부족하는 경우도 있다. 이 경우는 내열도에 의하지만, NR, SBR등으로 내열성이 좋은 배합을 설계하는 것이 유리한 경우도 있다.

이외 動的특성, Creep특성, 저온특성, 금속과의 접착력 耐충격성 耐피로파괴성능등의 각 성능을 조절하기 위해서도 원료고무와 배합의 선택을 한다. 방진고무의 고무재료 표시는 사용 목적에 의한 종류와 정적전단 탄성율 (Gs, kg/cm<sup>2</sup>)로도 행한다. 고무재료의 표시는 spring 경도든가 인장강도로 행하는 경우도 있지만 방진고무의 주특성인 spring특성을 재료면에서 결정하는 것은, 그 탄성율이고, 경도 등이 부적당하기 때문에 그 속에서도 측정관리하기 쉬운 정적전단 탄성률이 채용되고 있다. 단지 하나의 원료고무의 배합에서는 그 Gs와 경도와와의 사이는 거의 일정의 관계가 있음으로 공장관리 등에는 경도계에 의한 경도관리를 할 수 있다.

방진고무로써 Gs의 실용범위는 우레탄의 고무를 제외하면 대체로 5~20kg/cm<sup>2</sup>의 범위이고 10kg/cm<sup>2</sup> 전후의 것이 사용된다. 고무재료

의 탄성율관리는 본래는 동적 탄성율을 관리하는 것이 당연하지만, 현재는 이를 공정관리에 채용할 간단한 측정방법이 되어 있지 않다. 또 동적 탄성율은 진동수, 진폭 등의 변화에 대응하여 변화하는 의존성을 갖고 있고, 하나의 측정조건치로 그 동적 특성을 대표 할 수 없다. 따라서 현재는 제품을 대상으로 실용면에서 동적 조건을 한정하여 그 동적특성을 측정관리하는 방법이 넓게 채용되고 있다.

## 5-2. 원료 고무

원료고무는 근년 각종의 합성고무가 개발되어 종래는 얻지 못했던 특성을 이용할 방진고무가 적용범위를 넓히고 있다.

### 5-2-1. NR

가장오래된 고무의 재료이다. 기계적 성질이 뛰어나고 가공이 쉬우므로 고무로서 다용되고 있다. 동적 특성도 안정하고 hysteresis 손실도 비교적 적고 일반적 방진 고무로서는 사용하기 쉬운 재료이다. 단지 내후성, 내유성이 떨어진 다. 그러나 배합기술에 의해 고무의 표면에 큰 인장응력이 없는 경우에 NR이라도 충분히 실용적 내후성은 있고 윤활유의 분위기 정도에서 NR이라도 사용가능하다. 원산지, lot 등에 의해 다소의 차가 있고 가격의 불안정성도 크다.

### 5-2-2. SBR

SBR은 styrene과 butadiene과의 공중합물이고 합성고무중에서 가장 옛부터 사용되고 있는 재료이고 많은 종류가 있다. Hysteresis 손실이 다소 크고 인장저항이 다소 떨어진다. 보강제의 선택의 따라 NR에 가까운 기계적 강도를 얻을 수 있다. Damping의 성능이 요구되는 NR과 단계적인 적절한 선택이 필요하다.

### 5-2-3. BR

Butadiene의 중합물이고 cis 1, 4결합 함유량에 따라서 고Cis-BR로 나눌수 있고 그 성능을 달리 하고 있다. 방진고무로써 BR단독으로 사용되는 것은 별로 없고 NR, SBR등으로 블렌드되어 사용된다. 일반적으로 Hysteresis손실이

적고, 탄성이 뛰어나고, 특히 저온의 탄성특성이 좋다. NR보다 내후성, 내유성이 뛰어나지만 기계적 성질이 떨어진다.

#### 5-2-4. IR

Isoprene의 중합물이고 NR의 주성분인 점에서 합성천연고무라 불리우고 있다. 동적특성, 내후성, 내유성은 NR과 거의 동등하고 기계적 성질은 조금 차이가 있고 떨어진다. 대부분의 경우 타종의 고무와 블렌드하여 사용된다.

#### 5-2-5. NBR

Acrylonitrile(AN)과 butadiene의 공중합물이고 일반적으로 nitrile 고무라고 불리고 있다. 뛰어난 내유성을 갖고 있어 acrylonitrile 함유량의 대소로 내유성이 지배된다. 방진고무로써는 25~35%의 중 nitrile, 중고 nitrile의 함유량의 것이 사용되며 AN 함유량이 높게되면 딱딱하여 방진고무로써 사용하기 어렵다. Hysteresis 손실이 일반적으로 크고 다른 고무와 블렌드하여 사용하는 것도 많다.

#### 5-2-6. CR

CR은 합성고무에서 오래된 역사를 가진 고무이다. Chloroprene 을 중합하여 만들지만 각종의 제조법이 있다. NR에 비해 내후성이 뛰어나고 큰 결점은 없다. Hysteresis 손실이 다소 큰 외에는 NR과 같이 균형잡힌 고무이다. 미국에서는 NR대신 범용고무로서 널리 사용되고 있다. 내한성이 떨어진다.

#### 5-2-7. IIR

Butyl고무는 isobutylene과 isoprene의 공중합물이다. 큰 진동감쇄 능력을 갖고 있다. 이외에도 내열성, 내후성등이 뛰어나다. 특히 damping 성능을 필요로 하는 곳, 예를 들면 engine mount, damper류에 사용된다. 단지 저온특성, 가공성이 떨어진다. 일반적으로 가교속도가 늦고, 비극성이기 때문에 접착성도 떨어진다. 일반용 고무와의 혼합성이 나쁘다. 이점에서 개량된 염소화 butyl, 불록화 butyl등이 개발되어 있다. NR, SBR과 블렌드하여 사용되는 것도

있다.

#### 5-2-8. EPDM

Ethylene, propylene과 불포화 결합을 가진 제3성분과의 3원공중합체이다. 내열성, 내후성 특히 내오존성이 뛰어. NR, SBR에 소량 블렌드하는 것에 의해 이들의 성질을 개량할 수 있다. 고온의 분위기에서 사용되는 방진고무에 이용된다.

#### 5-3. 고무의 배합과 混練

고무제품을 제조하는 것에는 우선 그 제품의 사용목적, 사용조건등에서 원료고무의 종류와 배합을 설계하고 가공 사양을 정하여 행한다. 원료고무의 종류와 선택은 사용목적, 조건에 의해 앞절의 원료고무 특성을 기안하여 결정한다. 원료고무의 특성을 발휘하기 위하여 배합을 목표탄성율, 기계적강도, 동적특성, 피로특성, 가공특성, 가공성, Cost 등을 고려하여 결정해 간다. 물론그과정에 있어서는 재료의 시작에 의해 시행착오도 반복된다. 배합이나 가공공정은 원료고무의 종류, 목적에 의해 다르고 그 전부를 기술하는 것은 무리이므로 이하 NR을 중심으로 기술함. 방진고무는 Rubber 100에 대하여 통상 3%(중량비 이하 동일) 내외의 황을 배합하고 140~170℃ 정도로 가열하여 고무분자(鎖狀고분자)의 사이에 황분자에 의한 가교를 행하여 고무에 탄성을 부여한다. 이 반응을 가교라고 부르고 실제로는 가교반응시간을 단축하기 위하여 가교촉진제를 1%와 촉진조제로서 ZnO를 5%정도 가하여 가교시킨다. 그리고 탄성율을 조정하기도 하고 여러 가지 기계적성질을 개선하기 위하여 보충제로서 카본블랙, 규산(SiO<sub>2</sub>), CaCO<sub>3</sub> 등을 가하고, 가소성을 증대하여 미가교시 가공성을 좋게 하기 위해 Stearic산 기타의 연화제를 첨가한다.(Stearic산은 연화제외에 보충제, 충전제의 보충효과 증대에 크게 기여함)또 내노화성을 개선키위해 노화방지제를 1%정도 배합한다.

NR은 배합에 앞서 우선 素練을 한다. 素練은 원료고무를 내림 roll(Banbury, open roll)에 걸

표 7. 방진고무용 배합의 예(NR)

정적전단탄성율(kg/cm <sup>2</sup> )	6	10	14
NR	100	100	100
Stearic Acid	1	1	1
노화방지제	2	2	2
ZnO	5	5	5
Carbon Black	15	30	50
CaCO <sub>3</sub>	10	8	4
S	2.5	3	3
가교촉진제	1	1	1
Total	135.5	150	166

어, 기계력에 의해 가소화하고, 불균일한 고무를 균일화하고 분자쇄의 절단 등에 의해 고무가 연하게 되고, 약품의 혼련작업을 용이하게 하고, 壓延押出등의 공정을 용이하게 하는 것이다. 원료고무종류에 따라서 예를 들면 IIR, EPDM등 素練을 필요로 하지 않는 것도 있다. 混練은 일반으로 素練한 고무를 Banbury 또는 open roll을 이용하지만 混練작업의 良否는 직접제품에 영향할 뿐만 아니라, 나쁜때는 제품을 불량으로 하는 경우조차 있다. 방진고무의 경우 spring정수를 관리하기 위하여 특히 약품의 분산을 좋게 하도록 주의하고 混練정도에 의한 가소도의 변동폭을 충분히 관리해야한다. 이 끝난 고무는 sheet상으로 하여 서로 밀착방지를 위하여 이형제, talc, MgO, CaCO<sub>3</sub> 등을 타분하여 완전히 냉각된 것을 저장, 숙성한다.

#### 5-4. 金 具

방진고무의 대부분은 金具를 접착하여 그 金具를 사용하여 기계의 고정을 한다. 金具는 주로 경강을 사용한다. 양산 또는 소형의 제품에는 press 가공의 金具를 사용한다. 고무와 접착하는 면은 보통의 경우 sand blast 혹은 grit blast를 충분히 하여 깨끗한 면으로 하여 TCE(trichloro ethane) 등으로 깨끗이 세정한다. 세정후는 녹의 발생이 없도록 관리하고 빠르게 다음의 공정으로 보내 접착제를 도포하고 가교를 행하도록 한다. 또 접착면에 인산처리를 하여 접착제를 도포 할수도 있다. 방청의 점에서

효과가 있다.

#### 5-5. 접 착

방진고무는 금속과 고무가 충분한 강도와 신뢰도를 갖고 접착할 수 있도록 되고 나서 급속히 발전하고 공업적으로 널리 사용되게 되었다. 접착제로서는 이소사아네이트계, 페놀계등이 있고 수많은 종류 것이 시판되고 있으므로 원료 고무배합, 금구재질, 방진고무의 사용조건, 환경 등에 의해 최상의 것을 선택한다. 옛부터 행하여지는 황동도금법이 있고 특히 고온에서 접착력은 아주 뛰어난도금기술과 공정관리가 어렵다.

#### 5-6. 금 형

방진고무는 주로 금형을 이용하여 제작한다. 금형은 방진고무의 형상, 寸法, 성형가교방식, 가교機의구조, 寸法, 성능 제품의 cavity수, 혹은 금형의 재질에 의해 각기 다른 구조를 갖고 그 종류는 다양하다. 금형의 良否는 제조의 능력에 영향하고 제품의 원가에 영향을 미치고 제품의 품질에 직접 관여한다. 따라서 금형의 설계는 제반조건을 충분히 유의하고 그 취급에 주의하지 않으면 안된다.

##### 5-6-1. 금형의 설계

금형의 설계는 다음과 같은 주의가 필요하다.

##### 1) 구조가 간단할 것

금형의 조립, 분해의 영역은 생산성에 직접 영향 한다. 조립 때는 접착판 및 성형고무를 형에 넣기 쉽고 가교가 끝나 형을 분해할 때는 고무나 접착판에 무리한 힘이 걸리지 않도록 하고 제품을 형에서 들출 노크아웃트 핀의 위치도 집중력이 걸리지 않도록 배려해야 함.

##### 2) 정확한 제품이 될 금형일 것

고무의 흐름이 나쁜형은 충분히 형을 압착할 수 없고 수치製品이 되기 쉽다. 더 나아가 형과 고무와의 사이의 공기가 빠져나가지 못하는 구조를 피해 air vent를 설계해야 한다. 또 가교후의 고무 수축을 생각하여 금형에 정확한

수축율을 갖도록 할 필요가 있다. 접착판의 부근 내부에 접착판 포, 등이 들어있는 경우등은 수축율이 적게 되므로 유의해야 한다. 보통의 경우 고무수축율 2~3%이다.

### 3) 주입공의 위치 등에 주의할 것

Injection, transfer 성형의 금형은 주입공, 금형의 이음매, 금구와 주입공의 관계 위치 및 사용고무의 배합고무에 유의한다. 주입공의 위치, 형상, 大小에 의해 주입효율이 좌우되고 cavity 내의 주입불량, 고무의 scorch 등을 일으키고 또 접착판, 이형체등이 고무중에 섞힐 위험이 있다.

### 4) 제품의 仕上이 용이할 것

형의 이음매에 여분(flash)의 고무가 나와 제품의 외관을 나쁘게 하므로 사상을 해야 하는 경우가 있다. 따라서 사상하기 어려운 곳에서 여분의 고무가 나올 수 있는 구조의 설계를 피해야 한다. 제품에 따라서는 특성상 여분의 고무 흔적이 있어서는 안되는 면이 있으므로, 이런 면에는 형의 이음매를 오도록 설계, 혹은 vent hole 등 혹은 주입공을 설계하지 않도록 해야 한다. 또 형의 이음매를 될 수 있는 한 적은 구조로 설계하고 맞붙는 면의 사상의 정도를 높혀 충분한 압착에 의해 특히 주입형식의 금형은 전혀 여분의 고무흔적이 생기지 않도록 만들 수가 있다.

### 5) 쥘의 제작비가 염가일 것

금형의 제작가공의 면에서도 생각하여 설계를 간단히 하고 재료, 기계가공을 합리화하여야 한다. 또 금형의 중량은 형의 내구력을 생각해 가볍도록 하여 가교작업을 쉽도록 해야 함.

### 5-6-2. 금형의 재료

금형의 재료는 가교작업시의 加壓力, 고무의 팽창압, 온도의 변화 등에 대해 충분히 견디는 변형이 적고, 또 조립 분해시의 충격 등에 대해 미열이 적고 형의 제작가공이 쉽고 사상면이 평활인 것 등의 특성이 필요하다. 보통 연강이 이용되고 기타 알루미늄, 아연합금등도

사용된다. 아연합금은 내구력이 약하므로 철재로 보강해야 한다. 또 형의 고무면을 보호, 고무면의 광택을 목적으로 경질크롬도금을 하는 경우도 있다.

### 5-7. 成 型

방진고무의 가공은 고무재료, 金具, 금형 등의 준비가 끝나면 가교전에 가교를 위한 재료 준비 성형을 행한다. 混練이 끝난 고무를 계속 하여, 또는 저장한 것을 다시 roll에서 가공, 가교공정에 고무재료공급에 알맞은 形狀寸法으로 가공한다. 보통의 경우 사출성형용으로는 긴 tape상으로 transfer성형용으로는 제품의 고무양에 맞는 판형으로 보통압축용 성형을 위해서는 少型은 제품의 용도에 맞는 고무편으로 大 型의 것은 대체제품의 형상으로 가공한다. 내후성을 위해서 CR이나 EPDM피복을 할 경우는 이때 제품의 형상을 한 성형고무위에 CR의 sheet를 붙인다.

### 5-8. 가 교

성형이 끝난 고무는 金具와 함께 금형에 넣고, transfer, injection가교의 경우는 고무의 유입이 완료된 상태로 가압하여 가공한다. 이것에 의해 고무분자가 가교(황)계에 의해 가교반응을 일으키고 고무는 탄성체로 되어 특성을 가진 방진고무로 된다. 이 공정을 가교(가황)이라고 부른다. 이 때 고무와 金具의 사이에 접착체가 작용하여 접착반응을 일으키고, 고무와 금구는 強固히 접착한다. 방진고무의 가교(가황)방법은 여러 가지 있지만 代表的인 것을 들어보자.

#### 5-8-1. Heater-Press에 의한 가교

아주 일반적인 가교법이다. 고무를 충전한 금형을 Heater-press에 넣어 가교 가열한다. Heater源으로는 증기, 전열등이 熱媒로 사용된다. 열은 상하의 press면에서 금형, 고무에 전달되므로 아주 높은 제품의 가교는 측면에서 열의 손실이 많고 또 열량의 차도 press면과 중앙근처는 크게 되어 가교에 크게 영향을 미친

다. 이 같은 경우는 금형에 적당한 보조열원을 넣어 열량의 바란스를 취해야 한다. Press 가압은 유압, 수압 등을 사용하며, press를 rotary狀으로 배열하고 순서대로 회전시켜 금형의 분해 조립을 한 곳에 행할 수 있도록 한 rotary press도 있다. 금형에 사입고무형상, 수치(용량, 중량), cavity내의 장착등이 가교제품의 良否, loss고무의 최소에 key point로 된다. 가교초기의 加壓力의 압력변동을 일으키지 않는 것도 중요하다.

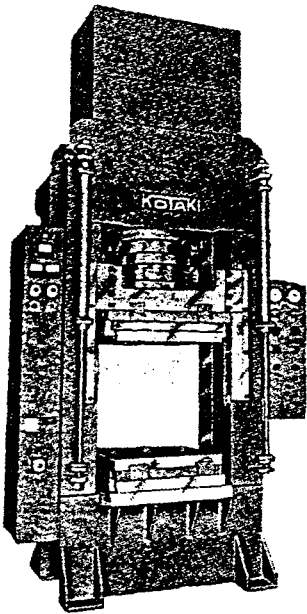


그림 30. 가교 Press

5-8-2. Transfer 가교(가황)

Heater-Press에 의한 가교방식이지만 고무를 금형외부에서 press의 加壓力을 이용하여 금형 cavity에 주입하는 방식이다. 보통은 금형상부에 설계한 pot와 plunger에 의해 pot내에 넣은 고무를 press로 가압하여 금형의 주입공에 주입한다. Pot와 plunger와 금형과 一體로 된 것도 있지만 대체로 press上面板에 장치되어 있고 press면판을 유효하게 사용되도록 배려한다.

Transfer 성형 가황은 고무재료의 준비가 보통 압축가황때와 같이 제품개개의 고무를 성형하지 않고도 금형 cavity 전체의 고무의 양을

판형으로 하여 pot에 주입하면 되므로 성형의 효율이 좋고 cavity내의 주입공을 통하여 고무를 주입하므로 마찰력에 의해 고무의 온도가 약간 올라가 가교시간의 단축도 가능하다. 또 고무의 깨끗한 면이 金具의 가교면에 가하므로 가교력의 방향과 안정이 기대된다. 그러나 pot의 밑의 일면에 1~2mm 두께의 고무가 주입되지 않고 남아 동시에 가교되므로 電熱面에서 다소 불리하고 고무의 loss량도 크다

5-8-3. Injection 가교

사출성형기를 사용하여 고무를 금형에 압입,

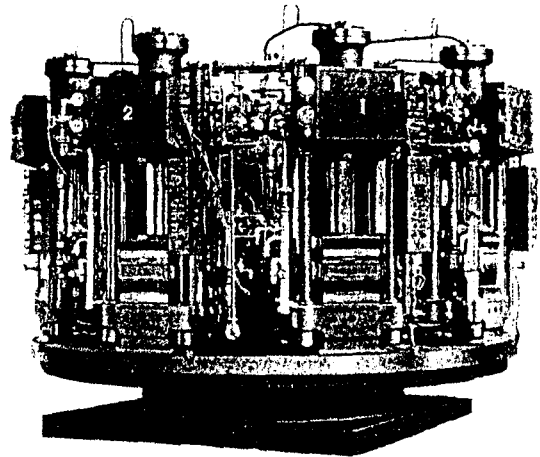


그림 31. Rotary Injection 성형기

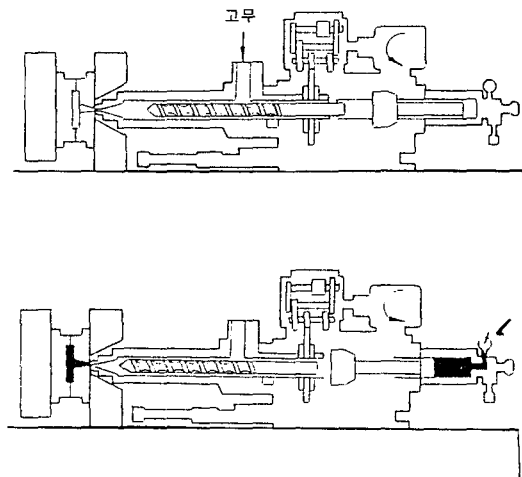


그림 32. Injection 성형 가교

가교하는 방식이다. Plunger형 또는 screw plunger형의 사출기구를 가진 사출부와 금형을 가압 가열하는 press부를 일체로 한 사출성형기가 이용된다. 작동도 거의 자동방식으로 되어 있고 무인조작도 가능하다. 고무는 strip상이나 pellet상으로 plunger내에 공급되어 여기서 충분히 예열되어 금형의 cavity내로 고압 사출된다. 따라서 가교시간의 단축, 복잡한 형상의 제품의 제작, 대량생산 등 생산성의 향상이 기대된다. 단지, 설비비, 금형비 등이 고가이다.

### 5-9. 원통형 방진고무의 조임가공과 壓入가공

통형방진고무는 그 피로특성을 증대시키기 위해 가교후 고무에 압축응력을 받도록 가공한다. 내외통접착 type의 원통형 방진고무는 대부분의 경우 외통을 주입가공한다.

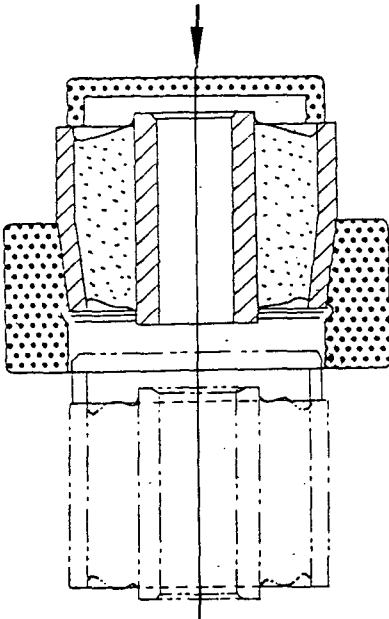


그림 33. 조임가공

외통에 튀어나온 형상이 있어 조임을 할 수 없는 경우는 내통을 확대한다. 단, 이는 바깥통 조임에 비해 효율이 나쁘다. 조임가공은 방진고무를 거의 조임후의 수치가 제품의 수치에

적응하도록 행한다. 조임률은 생고무의 두께의 10~15%정도이다. 조임에 요하는 하중은 사이즈에 의해 다르지만 통상 500~2000kg 큰 것은 50ton 이상의 것도 있다.

外經寸法은 조임 후  $\pm 0.2\text{mm}$  정도의 오차가 나므로 정밀도를 요하는 경우는 연마가공을 한다.

외통비접착 또는 내외통 비접착 type의 원형 방진고무는 가교고무의 tape 치구 등을 이용하여 내외통에 압입한다. 고무의 압축률은 통상 고무의 25~40% 정도이다.

압입후의 고무의 안정성을 증대하기 위해 압입전 고무의 형상을 안장형으로 하는 것도 있다. 또 이는 spring정수의 조절에도 몹을 한다.

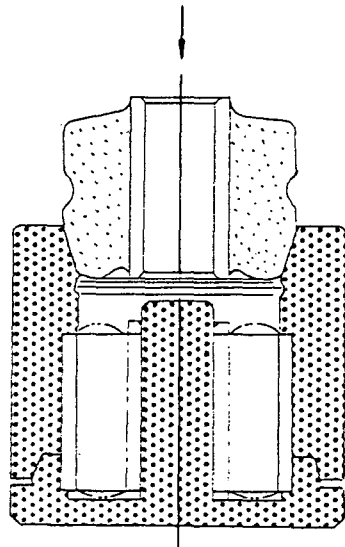


그림 34. BUSH의 압입조립

## 6. 진동의 절연과 고무의 기능

### 6-1. 진동절연의 원리

피지지체를 방진고무(spring)를 이용하여 기초에 장착하는 것을 탄성지지라고 한다. 탄성지지의 목적은 진동절연 또는 충격절연(Vibration or Shock Isolation)이다. 이에 반하여 2개의 충돌물체 사이에 완충고무(spring)를 개재시

켜 충돌시의 충격력의 peak치를 저하하는 것을 spring완충(Shock absorption by spring)이라고 한다. 진동과 충격절연은 전달경로로 보아 다음 2가지로 나눌 수 있다.

6-1-1. Active application(능동적용법)

기계의 운전(자동차움직임)에 따르는 진동의력 또는 충격력이 기초에 전달되는 것을 방지한다. (디젤발전기, 진동 conveyor, 유압press 등, 방진고무).

6-1-2. Passive application(수동적용법)

기초에 다른 원인으로 존재하는 진동 또는 충격적 운동이 기계에 전달되는 것을 방지한다. (자동차의 현가장치, 철도차량의 대차의 방진고무, 정밀기계의 탄성지지)

1) 진동의 외력과 전달율

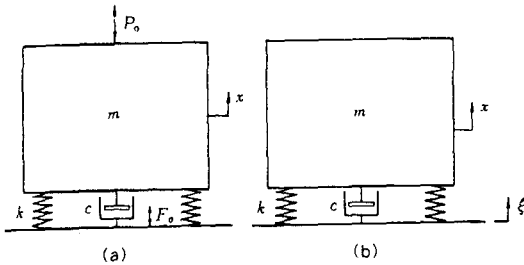


그림 35. 1자유도 진동계

그림 35에 표시 했듯이 1차원 진동계에 정현파의 가진력이 움직이는 경우를 생각하면(능동적용법), 이 경우의 운동방정식은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$P_0 \cos \omega t = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \dots\dots\dots(1)$$

m: 질량, C: 감쇄계수, k: spring정수, x: 변형, t: 시간, w: 원(작용)진동수이며, 좌변에는 가진력을 나타내고 있다.

(1) 식의 정상 해

$$x = x_0 \cos(\omega t - \phi) \text{ 를 구하면}$$

$$\text{진폭 } x_0 \text{ 는 } x_0 = \frac{P_0}{k} / \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \dots\dots\dots(2-1)$$

$$\tan \phi = \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{\omega}{\omega_n}\right) / \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right) \dots\dots\dots(2-2)$$

를 부여한다.

여기서  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  : 고유진동수

$c_c = 2\sqrt{mk} = 2m\omega_n$  : 극한감쇄계수

이다.

기초에 전달되는 힘은 spring력과 점성저항으로서 양자는 위상이 90도 틀리므로 합성된 전

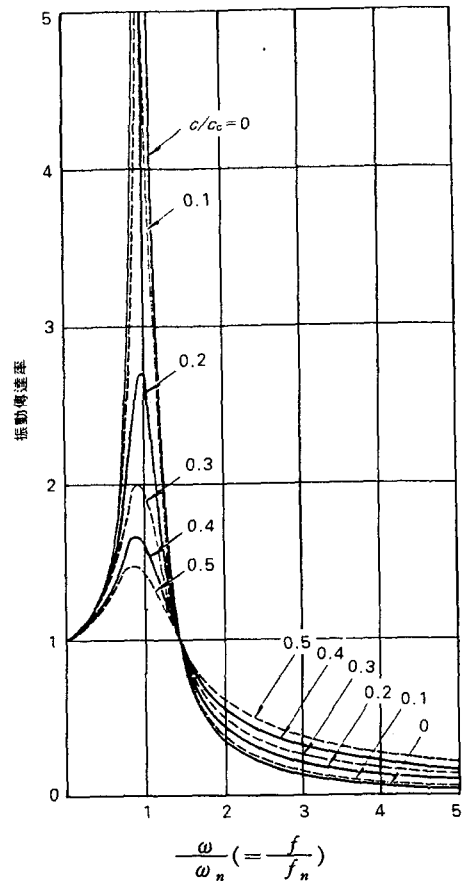


그림 36. 전달율과 감쇄계수



달력의 진폭은  $x_0\sqrt{k^2+(wc^2)}$ 로 부여된다.  
전달력과 가진력의 진폭비를 힘의 전달율(Transmissibility)라고 한다.

· 힘의 전달율(Tr)

$$Tr = \sqrt{1 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2} / \sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2} \dots\dots\dots(3)$$

2) 강제진동과 전달율

그림 36에 나타난 1차원 진동계에서는 기초에 정현파의 변위  $\xi = \xi_0 \cos \omega t$ 가 부여 되었을 때 질량  $m$ 은 어떤 운동을 하는 가를 조사하면 (수동적용법)

$$mx + cx + kx = c\xi + k\xi \dots\dots\dots(5)$$

이 방정식을 1식과 비교하면

$$P_0 = k \xi_0 \sqrt{1 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2} \dots\dots\dots(6)$$

로 치환한 것에 해당한다.

$$x_0 = \xi_0 \sqrt{1 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2} / \sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2} \dots\dots\dots(7)$$

질량과 기초의(변위의) 진폭비를 변위의 전달율로 이름지으면 변위의 전달율과 동일하게 (3) 식으로 표시할 수 있다. 따라서 힘과 변위를 구별하지 않고 전달율이라고 한다.

$$\text{전달율(Tr)} = \frac{\sqrt{1 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n}\right)^2}}$$

진동절연은 전달율이 적어도 1이하, 나아가 될 수 있는 한 적게하는 것으로 그림 36에서

알수 있듯이  $\frac{w}{w_n} > \sqrt{2}$ 로 되도록  $w_n$ 을 선택하는 것이다.

6-2. 방진고무와 전달율

이상의 것은 coil spring같은 선형 spring과 oil damper같은 선형성저항의 경우의 전달율이고  $\frac{w}{w_n} > \sqrt{2}$ 의 영역에서  $\frac{c}{c_c}$ 가 적은쪽이 유리(전달율이 적은)한 결과가 얻어진다. 그러나 방진고무의 경우 기계진동수의 범위- 주파수특성이 전이역보다 아주 저주파의 영역에서는  $k$ 는 진동수에 무관계이고 더욱이  $wc$ 가 근이적으로 정수라 간주한다.

이 경우

$$k_1 = k, k_2 = wc$$

$$\iota = \tan \delta = \frac{k_2}{k_1} = \frac{wc}{k} \text{라고 하면}$$

$$2 \frac{c}{c_c} \cdot \frac{w}{w_n} = \frac{wc}{k} = \iota \text{로 되며}$$

전달율은 다음과 같은 형으로 표시 할 수 있다.

$$Tr = \frac{\sqrt{1 + \iota^2 (\tan \delta)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \iota^2 (\tan \delta)^2}} \dots\dots\dots(8)$$

그리고 이 경우에는

$\frac{w}{w_n} > \sqrt{2}$ 의 범위이고  $\iota$ 의 큰 것이 선형점성저항의 경우 일수록 불리(전달율이 큰것)한

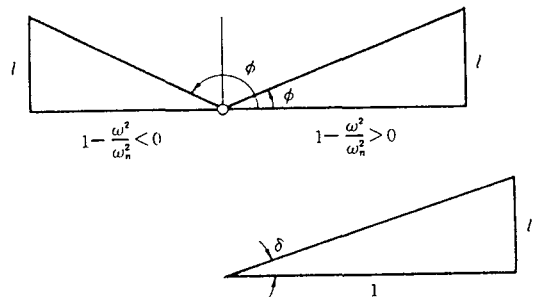


그림 37. 위상차 각  $\phi$ 과 손실각  $\delta$

것이 아닌 것을 알 수 있다.

위상각  $\phi$ 는 가진력P에 대한 변위(형)  $x$ 의 위상차 각이고 손실각  $\delta$ 는 방진고무를 움직이는 전달력F와 변위(형)  $x$ 의 위상차 각이다. P와 F와의 사이에는 관성력  $m\ddot{x}$ 만의 차이이다.

$$\frac{\omega}{\omega_n} \ll 1 \text{ 일 때 } \phi \approx \delta$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = 1 \text{ 일 때 } \phi = \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{2} \text{ 일 때 } \phi = \pi - \delta, \quad \frac{\omega}{\omega_n} \gg 1 \text{ 일 때 } \phi \approx \pi \text{ 이다.}$$

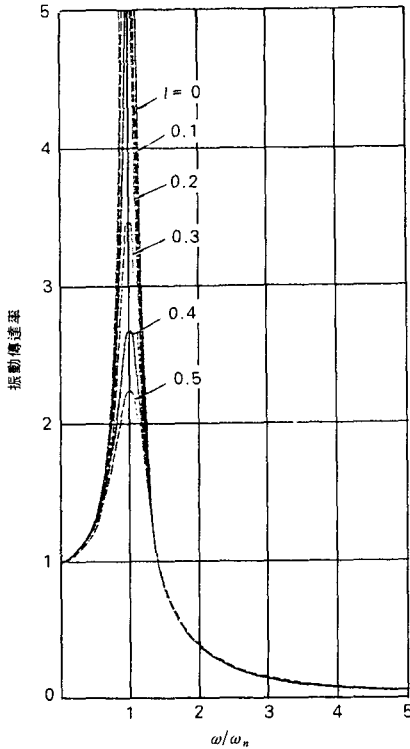


그림 38. 전달율과 손실계수

### 6-3. 진동절연

(8)식 혹은 그림 38에서  $\omega_n$ 을 작게하는 방법은 2가지가 있다.

- ①  $k_1$ 을 작게 선택하는 것이고
- ② 기초에 질량을 가하는 등,  $m$ 을 적게 하

는 것이다.

기계의 기동, 정지시에는 공진점을 통과하므로 손실계수가 어느 정도 큰 것이 바람직하다. (정지시가 일반적으로 공진하기 쉽다)  $k_1$ 을 너무 작게 선정하면 공진시의 진폭이 과대하게 되기도 하고(능동적용법), 방진고무의 정적변형이 너무크게 되므로 불안정하게 되는 것이다.

실제로는  $\frac{\omega}{\omega_n} = 3$ 으로 전달율이  $\approx 0.13$ 으로 되고 대개의 경우 이정도로 진동절연의 목적을 거의 달성할 수 있다.

또, 가진력  $P(t)$ (가(강)제변위) 주기적이지만 정현파가 아닌 경우 이를 Fourier급수로 전개하여

$$P(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \dots (9)$$

로 표현한다. 이 경우에도 최저주파수 성분  $a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t$ 에 착안하여, 정현파진동으로서  $\omega_n$ 선정을 한다.

### 6-4. 고유진동수와 spring의 변형(Deflection, 上下動)

진동절연의 요점은 고유진동수  $\nu_n$ 을 적절이 선정하는 것이다. 그런데 “상하움직임의 고유진동수에 한정하여” 기계의 자중에 의한 spring(방진고무)의 deflection  $\delta_{st}$ (cm)에서 바로 구할 수 있다.

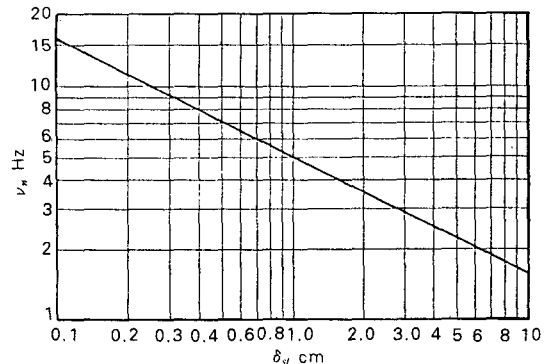


그림 39. spring의 정적 deflection(cm)과 고유진동수(Hz)

$$\nu_n = \frac{\sqrt{g}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta_{st}}} = \frac{5.0}{\sqrt{\delta_{st}}} \dots\dots\dots(10)$$

여기에서 주의를 요하는 것은 식(10)을 유도할 적에 "정적 및 동적 spring 정수는 동일하다"는 가정이다. 방진고무의 경우 이 가정은 정확치 않으므로 결국 식 10 또는 그림 39는 계산을 위한 공식이다.

### 7. 방진고무 재료

방진고무의 신뢰성의 확보의 원칙으로서 고무재료를 보면 NR, SBR, BR 등의 diene계의 고무가 적합하다. 이것은 지지라는 기능이 고무의 특징인 가교라는 3차원구조의 밀도를 요구하고 있다고 이해할 수 있으며 많은 가교가능점을 가지고 있는 butadiene, isoprene을 골격으로 한 고무재료가 적합하다는 것이다. 또한 환경온도에 대한 지지 sping의 보지율, 탄성의 변화를 보아도 원래 고무의 탄성이 가교밀도와 절대온도에 규정되는 entrophy탄성인 점에서 NR을 필두로 BR, SBR이 양호하고 가교점을 강제적으로 확보하지 않으면 안되는 EPDM, IIR 또한 분자운동이 난이하고 결정상태를 이용하여 탄성을 확보하는 FKM등과 비교하여 diene계의 고무가 적합함을 알 수 있다. 더욱이 반복변형의 신뢰성 큰변형에 대한 적응내력, 정하중 조건에서의 반복피로 사용온도에서의 반복피로성을 생각하면 역시 diene계의 응용이 바람직하다.

#### 7-1. 방진고무재료의 요구특성

##### 1) 파단특성

- a. 신장결정화(NR, IIR, CR, HSB)
- b. 높은 분자간 응집력(NR, SBR, NBR)
- c. Filler와 높은 친화성(NR, SBR, NBR)으로 분류되며 응력을 분산시키는 화학구조가 특징적이다.

##### 2) Creep

특히 면진고무, 액체봉입 mount 등의 고무에

요구되는 중요한 특성이다. 고무의 분자 회전성이 높고 응집에너지가 낮을수록 좋다. 동일 분자량, 동일 가교도이면 유리전이온도가 낮은 무정형의 고무가 유리함.

Q > BR > NR > EPDM > SBR > CR > NBR > T

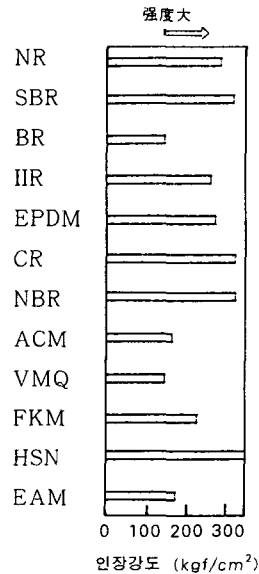


그림 40. 각종고무의 인장강도

#### 3) 내열성 및 내열산화성

기계적 모든성질의 온도 의존성이 낮을수록 바람직하다. 최근 Damper의 사용온도가 100℃ 달하고, 액체봉입방진 고무의 열간내구성이 80℃-130℃가 요구되고 있다.

종래의 동배율의 관계로 NR, NR/SBR, NR/BR의 Blend가 이용되었지만 EPDM 및 VMQ도 검토되고 있으며 적용되고 있다.

#### 4) 금속과의 접착성

접착성은 내구피로와 직접적관계가 있으며, diene계 고무인 NR이 넓게 사용되고 있는 이유중의 하나이다.

#### 5) Hysteresis

진동에너지를 흡수하기 위해서는 진동에너지를 분자의 마찰에너지로, 즉 발열변환 시키지

않으면 안된다. Diene계의 고무가 적합하며 가교구조도 큰 영향을 미친다.

### 6) 감쇄계수

방진고무에서 감쇄계수(tan δ)가 크고 온도 의존성이나 주파수 의존성이 좋아야 한다. 그러나 현실적으로 주파수 의존성이 크다. NR은 감쇄가 적고 소변형에서 대변형에 이르기까지 선형의 복원을 한다. 거의 주파수에 의존하지 않는 특성을 가지고 있다. Butyl고무는 감쇄가 크다.

### 7) 탄성을

탄성은 온도 및 진폭의존성이 낮은 쪽이 좋다. 고감쇄 면진고무는 -30 ~ +30°C, Torsional damper는 -60 ~ +100°C의 온도영역에서 사용된다. 실용고무재료에서는 카본블랙 등의 보강제가 사용되기 때문에 동특성이 비선형으로 나타난다. 이는 응집C/B의 변형에 의한 Structure의 형성, 더욱 변형이 진행하면 Structure의 붕괴와 분산에 의한 것이라 생각된다.

### 8) 동배율

NR의 동배율은 다른 고무에 비해 낮은 것이 특징이다. 감쇄의 특성에서는 동배율이 높은 쪽이 유리하지만, 동적특성의 온도의존성, strain의 존성, 동적 strain에 의한 발열 및 내피로특성을 보면 저동배율쪽이 좋다. 예를 들면 500Hz에서  $\frac{K_d}{K_s} < 2$  같은 낮은 동배율이 요구되고 있다.

저동배율의 고무는 분자회전이 용이, 분자간의 상호작용이 낮고 분자운동이 활발, 분자의 entanglement가 해방되기 어려움, filler와의 결합이 강함 및 화학가교가 충분이 행해져 있다 등의 이유에 의한다고 생각 할 수 있지만 아직 명확하지 않다.

## 7-2. 방진고무 재료의 영향

### 7-2-1. Reinforcement 및 Additive

카본블랙이나 실리카를 배합한 복합계의 고

무중에는 복잡한 상호 작용이 존재하고 있다.

- (P-P 상호작용): 고무분자간 및 고무분자 내의 상호작용

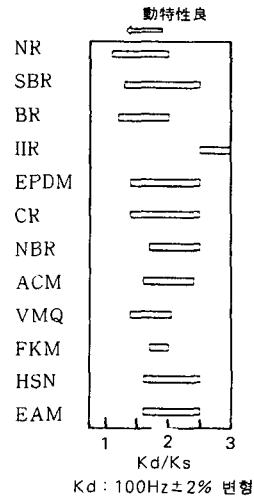


그림 41. 각종고무의 동배율

- (P-F 상호작용): 충전제의 계면과 고무의 상호작용

- (F-F 상호작용): 충전제간의 상호작용

특히 F-F간의 상호작용이 동적특성에서는 현저한 비선형성의 원인이다. 이들에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. Payne는 이들 동적 strain 진동에 대한 동적전단탄성을 측정하고 그 기구의 설명을 했다. 그림 42에는 Payne의 연구결과를 도식적으로 나타냈다. 그림에서 정적 전단탄성은 현저한 비선형을 나타내고 있고 점탄성은 4가지의 성분에서 성립되고 있다.

- [순고무의 탄성율]
- [계면의 결합효과]
- [유체역학적 효과]
- [고차응집구조의 효과]

[고차응집구조효과]는 충전제 입자의 상호작용이고 Van der waals력(力)에 의해 입자는 고차응집체를 형성한다. 이 구조가 외부에 의해 파괴-재편성되는 것이 비선형성의 원인이 되고 있다. 이 고차구조의 재편성과정에서 내부손실

(내부마찰)의 증가도 가져오고,  $\tan \delta$ 가 증가하고 결과로서 반발탄성이 저하한다. Filler 특히 C/B와의 상호작용을 고려하여 고무의 증합시에 고분자말단을 수에 의해 동적특성이 현저이 개선됐다는 보고<sup>6</sup>가 있으며 공업화에 성공하고 있다. 상기의 idea에서 고무가공기의 내에서 전단응력에 의한 mechanical 반응을 이용하여 고무와 filler를 반응시켜 동적특성을 개량코져 하는 시도가 있다<sup>7</sup>. 이 경우 말단의 반응은 아니고 주쇄의 반응이다.

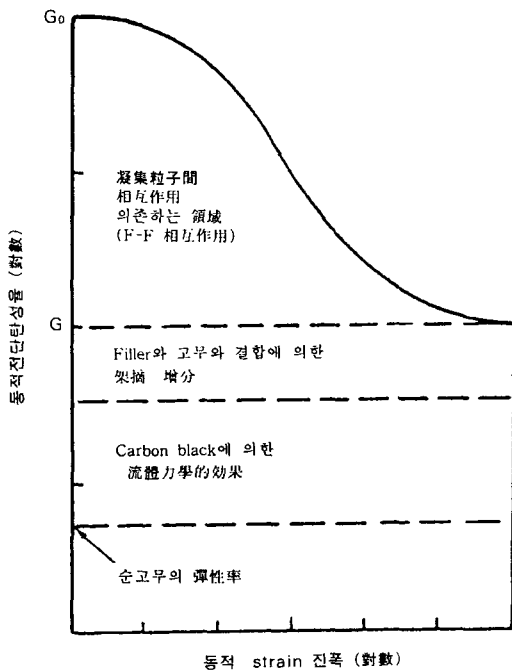


그림 42. 동적진단탄성률의 Strain진폭의존성

표 8. S-SBR의 분자구조

재료번호	1	2	3	4	5	6
결합ST(%)	12	15	23	20	25	20
BD부의 vinyl(%)	73	35	38	60	35	11
Glass전이점(°C)	-26	-68	-53	-33	-56	-80
분자말단 변성	○	○	○	○	×	×

7-2-2. Silan coupling제

Silan coupling제는 무기충전제의 결점인 보강성의 증대나, filler 흡착방지 등의 목적으로

표 9. BR의 분자구조

재료번호	7	8	9	10	11
BD부의 vinyl(%)	71	71	11	11	high cis-1.4
glass전이점(°C)	-40	-40	-99	-99	-100
분자말단변성	×	○	×	○	×

표 10. S-SBR의 기본물성과 동특성

재료번호	1	2	3	4	5	6	E-SBR
인장강도(MPa)	16.2	15.6	18.3	16.9	17.3	12.3	20.1
신율(%)	470	410	460	470	460	380	560
경도(JIS A)	54	59	60	50	59	60	58
정적spring정수 $K_s \times 10^{-4}$ (N/m)	8.4	11.9	12.0	9.7	11.0	12.0	11.5
동적spring정수 $k_d \times 10^{-4}$ (N/m)	16.4	17.8	18.0	17.8	19.4	20.5	24.3
동배율, $K_d/K_s$	1.95	1.50	1.50	1.84	1.76	1.71	2.12
손실계수, $\tan \delta$	0.17	0.09	0.09	0.15	0.12	0.11	0.152
	-4	-2	-6	-3	-0	-4	

· 배합 : Polymer 100, FEF 40, Oil 5, Stearic산 2, ZnO 5, sulfur 1.8, CBS 1.2.

표 11. BR의 기본물성과 동특성

재료번호	7	8	9	10	11	NR
인장강도(MPa)	12.5	13.0	8.5	11.5	10.0	26.1
신율(%)	320	300	300	320	330	540
경도(JIS A)	62	60	59	64	60	59
정적spring정수 $K_s \times 10^{-4}$ N/m	12.5	12.3	12.8	14.7	13.0	10.2
동적spring정수 $K_d \times 10^{-4}$ N/m	28.5	24.4	20.6	19.6	19.3	16.8
동배율, $K_d/K_s$	2.28	1.98	1.62	1.32	1.48	1.65
손실계수, $\tan \delta$	0.178	0.172	0.100	0.06	0.080	0.092

배합 : polymer 100, FEF 40, oil 5, ZnO 5, Stearic산 2, 황 1.8, CBS 1.2,

이용되고 있다. 방진고무의 전개에 있어서는 규산마그네슘배합 SBR에 Silane coupling제를 첨가하는 것의해  $K_s$ 의 증대, modulus의 증대 및 반발저하에 의한 제품수명의 연장을 기대할 수 있다<sup>8</sup>는 보고가 있다. Yamakuchi등은

NN-bis(2methyl 2-nitropropyl)1, 6diaminohexane (BNAH)가 NR계 방진고무에 있어서 진동소음저

감의 중요한 factor인 E'의 주파수 의존성을 저하하고, 동배율을 현저히 저하한다고 했다.

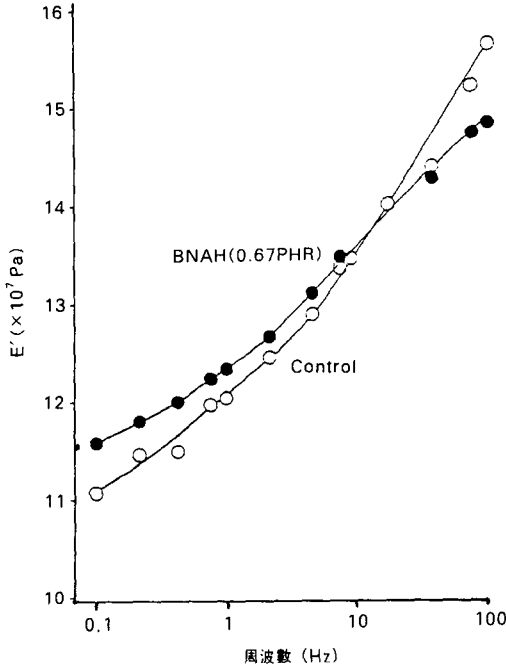


그림 43. E'의 주파수 의존성

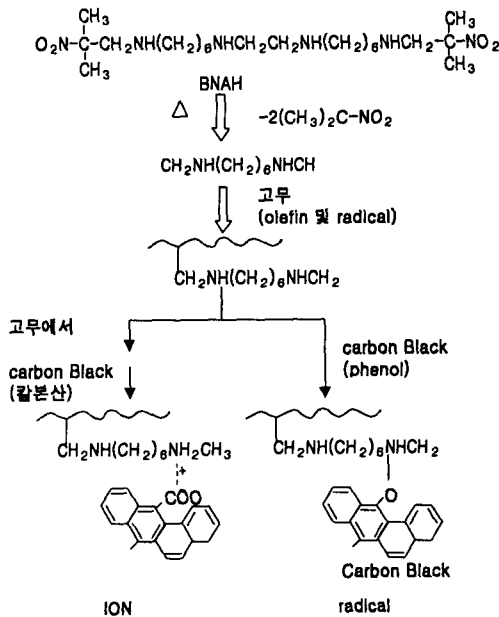
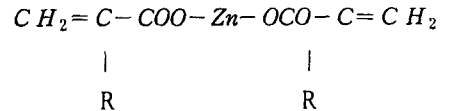


그림 44. BNAH의 개질기구

### 7-2-3. 가황구조

방진고무는 spring 특성외에 내구성이 중요한 요소이다. 제품설계상 이들의 개량은 가황제 (cross linking agent, 가황촉진제)의 개량에 의하는 경우가 많다. Engine mount등은 내구, 내열성 요구가 엄격하다. 더구나 큰변형을 반복해서 받으므로 내구피로의 점에서 NR 고무를 중심으로 가황제를 개량하려 하는 방법이 채택되고 있다.

EV(유효가황)나 semi-EV계가 일반적으로 사용되고 있지만, 동적피로에 노출되었을 때 피로수명에 영향을 미친다. EV계는 내열성의 향상에 비해, 피로특성이나 금속과의 접착성 저하의 점이 지적되고 있다. 이점에 대해 신규의 가황제로서 강도저하나 고온물성의 저하없이 내열성이 뛰어난 가황제의 연구가 진전되고 있다. 황 가황제의 가황조제로서는 metacry산Zn이, peroxide가교, EV가교에 비해 인장강도가 개량되는것이 보고되고 있다.<sup>9</sup>



이 화합물은 peroxide 가교에서 우수한 re-tarder 효과를 보이며 또한 경도나 강도의 현저한 증가를 보인다. 또한 황가교에서는 내열성의 한계가 있고, 보다 고도의 내열성의 향상을 위해 비황가교가 연구되고 있다. N, N'-m-phenylene bismaleimide는 peroxide계의 가교제로 알려져 있지만 황공존하에 MBTS나 TMTD 등의 disulfide계의 가황촉진제와 병용하여 우수한 압축변형성과 내열성 및 저발열특성을 보고했다.

### 7-2-4. 방진고무 배합 Data

표 12. 0.55 MPa Shear Modulus(Hs 45, IRHD)

Material	Part by weight
SMR5L	100
ZnO	5
Zinc-2-ethylhexanoate	1
SRF	30
TMQ(RD)	2
HPPD	4
OBS	1.7
TBTD	0.7
S	0.7

.. Vulcanizate Property(60min at 153°C)

- 비 중(ISO2781, ASTM D2000) : 1.07
- 경 도(IRHD) : 45
- 인장강도 (MPa) : 26
- 신장율 (%) : 650
- 영구압축변형 (22Hr at 100°C, %) : 21
- Resilience, lupke (%) : 75
- Shear modulus (0-2%) : 0.70MPa
- Shear modulus (0-50%) : 0.55MPa

표 13. 0.79MPa Shear Modulus(Hs 56, IRHD)

Material	PHR
SMR 5L	100
ZnO	5
Zn-2-ethylhexanoate	1
SRF	55
TMQ	2
HPPD	4
OBS	1.7
TBTD	0.7
S	0.7

.. Vulcanizate Property (60min at 153°C)

- 비 중(Kg/m<sup>3</sup>) : 1.14
- 경 도(IRHD) : 56
- 인장강도 (MPa) : 23
- 신장율 (%) : 550
- 영구압축변형(22hr at 100°C) : 21
- Resilience, Lupke (%) : 68
- Shear modulus (0-2%) : 1.32
- Shear modulus (0-50%) : 0.79

표 14. 0.95MPa Shear Modulus (Hs 67, IRHD)

Material	PHR
SMR CV	100
ZnO	5
Stearic acid	2
SRF	60
Oil(N계)	5
HPPD	3
P-Wax	2
CBS	1.5
S	1.5

.. Vulcanizate Property (30min at 141°C)

- 비 중(Kg/m<sup>3</sup>) : 1.140
- 경 도(IRHD) : 67
- 인장강도 (MPa) : 23
- 신장율 (%) : 525
- 압축영구변형 (22Hr at 100°C, %) : 47
- Resilience, Lupke (%) : 70
- Shear modulus(0-2%), MPa : 1.75
- Shear modulus(0-50%), MPa : 0.95

표 15. 0.64MPa Shear Modulus(Hs 50, IRHD)

Material	PHR
SMR CV	100
ZnO	3.5
Stearic acid	2
SRF	25
Oil(N계)	5
HPPD(santoflex 13)	3
P-Wax	2
CBS	0.7
S	2.5

.. Vulcanizate Property (40min at 141°C)

- 비 중(Kg/m<sup>3</sup>) : 1.037
- 경 도(IRHD) : 50
- 인장강도 (MPa) : 27
- 신장율 (%) : 650
- 영구압축변형(22hr × 100°C, %) : 47
- Resilience, Lupke : 81
- Shear modulus(0-2%), MPa : 0.80
- Shear modulus(0-50%), MPa : 0.64

## II. 자동차용 방진고무의 특성 및 고찰

### 1. 자동차의 진동, 소음 특성의 분류

현상	진동수	요구성능
Body shake Engine shake	10 - 15Hz (약 ±0.8% 변형)	$\tan \delta$ 를 크게
실내소음	100Hz (약 ±0.2% 변형)	동배율을 적게

동배율 = 동적탄성율(Ed)/정적탄성율(Es)

### 2. 자동차용 방진고무의 방진 성능과 요구특성

방진고무	방진성능	주파수	전폭	온도범위	요구성능
Engine mount	저주파 idling shake대책 실내소음, 고주파 진동대책	10Hz전후 100Hz	대 소	0-60℃	$\tan \delta$ 크게 동배율 적게
Suspension (sturt, bush)	실내소음 승차감 주행안정성	100Hz전후	대	0-60℃	高硬度 低동배율
구동계방진 (Damper)	구동계의 진동, 소음 대책	200-500Hz	중	60-100℃	고온의 $\tan \delta$ 를 크게

### 3. Engine Mount의 動特性

Engine mount는 engine에서의 진동과 소음을 차내에 전달되지 않도록 하기 위하여 사용되기 때문에 특히 다른 고무보다도 동적 특성의 요구가 엄격하다. 또한, engine을 장기에 걸쳐 지지하기 위해 내구성, 내열성도 중요한 요구특성이다.

#### 3-1. 전달율 (Transmissibility)

그림 44와 같이 engine과 engine mount를 상정한 model로 진동이 상하의 방향에만 존재하는 자유진동계에 대해 질량 M, spring rake K와 그것에 병렬로 진동체의 속도에 비례한 점

성저항을 주는 장치 C를 붙인 경우에 대해 알아보자.

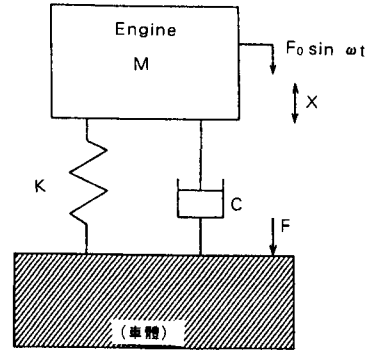


그림 44. 자유진동계의 Model

상부에서의 강제력  $F_0$ 와 하부에 전달되는 힘  $F_t$ 의 비를 전달률 Tr이라 하면

$$Tr = \frac{F_t}{F_0} \dots\dots\dots(1)$$

Engine mount와 같이 비교적 낮은 주파수 영역에서 사용되는 경우 전달율을 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$Tr = \sqrt{\frac{1 + (\tan \delta)^2}{[1 - (\frac{W}{W_n})^2]^2 + (\tan \delta)^2}} \dots\dots\dots(2)$$

$W$ : 작용진동수  $W_n$ : 고유진동수 =  $1/2 \pi (\tan \delta)^{1/2}$

$\tan \delta$ : 손실계수 (loss factor) =  $Cw/Ks$

#### 3-2. 동배율과 loss factor ( $\tan \delta$ )

그림 45의 전달율이 진동수 비( $\lambda = \frac{W}{W_n}$ )와  $\tan \delta = \frac{C}{Cc} = \frac{\tan \delta}{2}$ ,  $Cc$ : 임계감쇄계수)에 의해 변화하는 모양을 표시한 것이다. 이 그림에서  $\tan \delta$ 와 관계없이  $\frac{W}{W_n}$ 이 0과  $\sqrt{2}$ 의 때에 전달율이 1이 되는 것을 알 수 있다.  $\frac{W}{W_n}$ 가  $\sqrt{2}$ 이하



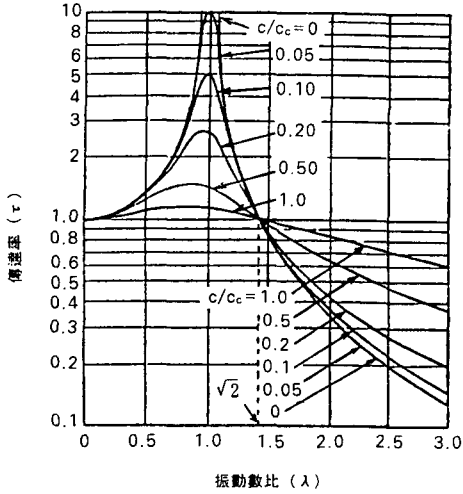


그림 45. 전달율

일 때에는  $\frac{W}{W_h} \approx 1$ 로 되고 식(1)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Tr = \sqrt{1 + \frac{1}{(\tan \delta)^2}} \dots\dots\dots(3)$$

곧,  $\tan \delta$ 가 클수록 전달율이 적게 되고 진동의 전달이 감소된다. 소위, damping이 큰 고무일수록 진동을 전하기 어려운 영역에 있고 engine mount는 통상 10-30Hz이하의 주파수 영역이다.

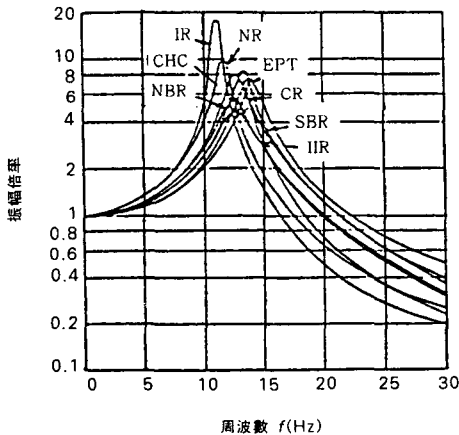


그림 46. Polymer별 공진의 배율

그림 46에는 polymer의 공진 배율을 나타냈다. NR, IR이 공진 배율이 높고, 저주파수의 영역에서 진동을 전달하기 쉽다는 것을 알 수 있다. 한편,  $\sqrt{2}$  이상에는  $\frac{W}{W_h} \gg \tan \delta$ 로 간주되는 식(1)은 하기와 같이 쓸 수 있다.

$$Tr \approx \frac{(1 + \tan \delta)}{\left(\frac{W}{W_h}\right)} = \frac{\left(\frac{Kd}{K_s}\right)}{\left(\frac{W}{W_h}\right)} \dots\dots\dots(4)$$

여기에서  $Kd = K+Cw$ 는 동적 spring정수를 나타낸다. 곧, 동적 spring정수( $Kd$ )가 보다 작을수록 전달율이 적게된다. 방진고무에 있어서 spring정수( $K$ )를 정적 spring정수를 이용하여  $\frac{Kd}{K_s}$ 를 동배율 또는 정동비(dynamic to static modulus ratio)라고 표시하고 있다.

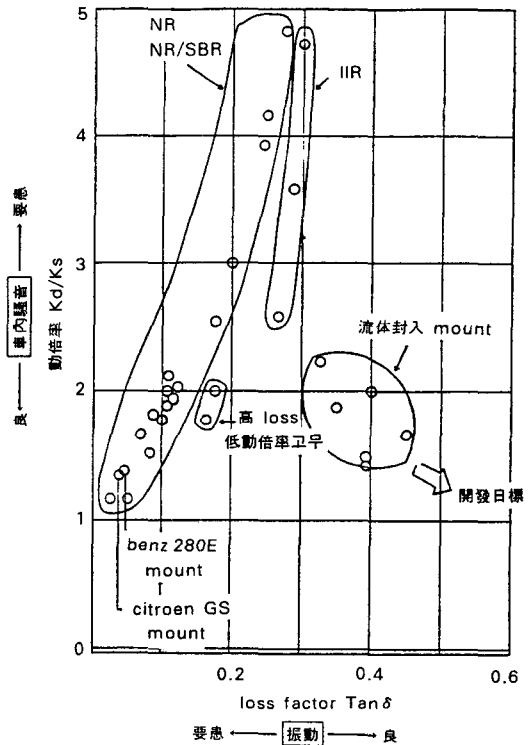


그림 47. 고무의 동특성 map

그림 47에 고무의 동특성 map을 나타냈다. 종축은 100Hz의 동배율( $\frac{Kd}{Ks}$ )이고, 횡축은 10Hz의 loss factor ( $\tan \delta$ )를 나타냈다.<sup>10,11</sup> 종축은 고주파 수에서 전달율의 정도를 나타냈으며, 1에 가까울수록 차내 소음은 낮게 된다. 또 횡축은 저주파수에서 전달율의 정도를 나타냈고 이는  $\tan \delta$ 가 클수록 진동을 전달하기 어렵다는 것을 나타내고 있다. 따라서 그림 우측하의 방향이 engine mount의 개발의 목표이다. 그러나 동배율과 loss factor는 그림에서 알 수 있듯이 상반되는 관계이다.

### 3-3. 동적 성능의 확보

진동전열을 목적으로서 방진고무를 사용하는 경우 고무재료에 요구하는 성질로서, 지지기능 spring 특성(정적 spring특성)과 진동시의 spring 특성(동적 spring특성)의 차이가 적을수록 좋다. 진동전열의 진동론에 따르면, 전달되는 힘은 고유진동수를 적게 하면 할수록 좋으며 그리고 고유진동수는 동적 spring 정수에 비례하고 질량에 반비례한다.

따라서 동적 spring 정수를 적게 할수록 진동의 절연성은 좋게 되지만 고무재료를 spring으로서 사용한 경우 일반적으로 동적 spring 정수가 정적 spring 정수보다 2-3배 크다. 방진고무의 지지기능 설계를 하면 동적 spring 정수의 크기가 그대로 진동전달의 크기로 되고 만다. 역으로 진동전열의 측면에서 방진고무를 설계 하면 지지 spring이  $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ 로 되어 혼돈 되고 만다. 또, 방진고무는 compliance 설계하는 것도 많고 이 경우 진동진폭과 동적 spring 정수의 적산이 진동전달력의 크기로 동적 spring 정수가 작은 것이 좋다. 동시에 지지기능을 생각하면 될 수 있는 한 정적 spring 정수와 동적 spring 정수의 차이가 없을수록 좋다. 공진을 통과하는 진동지지계인 경우 혹은 동적 흡수로서 방진고무를 사용하는 경우는 감쇄가 큰 쪽이 좋다.

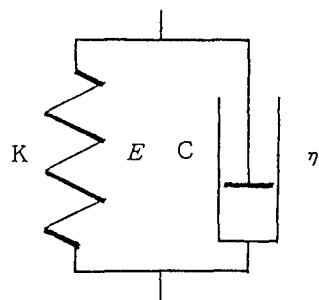
## 4. 방진고무의 재료

방진고무의 신뢰성의 확보를 원칙으로서 고무재료를 보면 NR, SBR, BR등의 diene계의 고무가 적합하다. 이것은 지지라는 기능이 고무의 특징인 가교라는 3차원 구조의 밀도를 요구하고 있다고 이해되며 많은 가교 가능 점을 갖고 있는 butadiene, isoprene을 골격으로 한, 고무재료가 적합하다는 것이다. 또한, 다소의 환경온도에 대한 지지 spring의 보지율, 탄성의 변화를 보아도 원래 고무의 탄성이 가교밀도와 절대온도에 규정되는 entropy탄성인 점에서 NR을 필두로 BR, SBR이 양호하고 가교점을 강제적으로 확보하지 않으면 안되는 EPDM, IIR, 또한 분자운동의 난이, 결정 상태를 이용하여 탄성을 확보하는 FKM등과 비교하여 diene계의 고무가 적합함을 알 수 있다. 더욱이, 반복변형의 신뢰성, 큰 변형에 대한 적응내력, 정하중 조건에서의 반복피로, 사용온도에서의 반복피로성을 생각하면 역시 diene계의 응용이 바람직하다.

### 4-1. Diene계 고무의 기술적인 과제

#### 4-1-1. 동특성의 지표

방진고무 재료의 동적 성질 지표는 지지기



$$E a p = K \cdot (h/A)$$

$$E a p = C \cdot (h/A)$$

定常振動時

$$E l = E a p$$

$$E l = \omega \eta$$

$$\tan \delta = E_2/E_1$$

그림 48. Voigt형 Model

능을 의미하는 정적탄성율, 진동시 응답성질을 나타내는 동적탄성율과 감쇄의 크기가 지표로 된다.

여기에서 K는 spring의 요소이고 정적 및 동적 스프링정수에 상당한다. 이 Model K에 ( $\frac{k}{A}$ )를 곱하면 겉보기 정적, 동적탄성율이 되고 고무특유의 형상 S를 고려하면 재료정수인 Young's modules E를 산출 할 수 있다. 한편 C는 감쇄계수이고 이 C에 변형속도를 곱하면 감쇄력의 크기로 된다. K와 같이 ( $\frac{k}{A}$ )를 곱하면 겉보기의 점성계수가 된다.

그러나 일반적으로는 감쇄의 크기는 손실탄성율과 저장탄성율의 비인 손실계수(loss factor,  $\tan \delta$ )로 표시하는 경우가 많다. 이 손실계수는 진동절연의 공진시의 전달력 peak 크기의 지표로 되는 점에서 방진고무 재료의 감쇄의 크기로서 이용된다. 따라서 동적탄성율(저장탄성율)에 손실계수를 곱하면 손실탄성율로 된다.

통상 재료의 동적 성질로써 보다 재료정수가 가까운 정적 혹은 동적 Young's 윌과 점성계수가 지표로 되지만, 방진고무의 경우 규격(JIS K 6394)에 표시된 것 같이 volume을 가진 방진고무 표준시료의 동적 성질이 다소 틀리기 때문에 재료의 물질정수와 형상을 가진 시료와의 이론적인 면이 아직 충분하지 않기 때문이다. 따라서, 방진고무재료의 동적 성질을 표준시료를 정하여 지지기능의 지표로써 정적 spring 정수를, 동적인 spring의 지표로써 동적 spring 정수를 감쇄력의 지표로써 loss factor를 제시한다.

#### 4-1-2. 동특성의 특성

그림 49에 NR계 고무재료의 각종배합제의 수준을 변경한 때 동특성의 변화 기여도를 표시했다. 이 원 graph에서 Kd, Ks, loss factor 도 경도 즉, carbon의 양의 기여도가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이 사실은 고무의 경도의 설계가 재료의 동특성에 큰 영향을 미친다는 것이다.

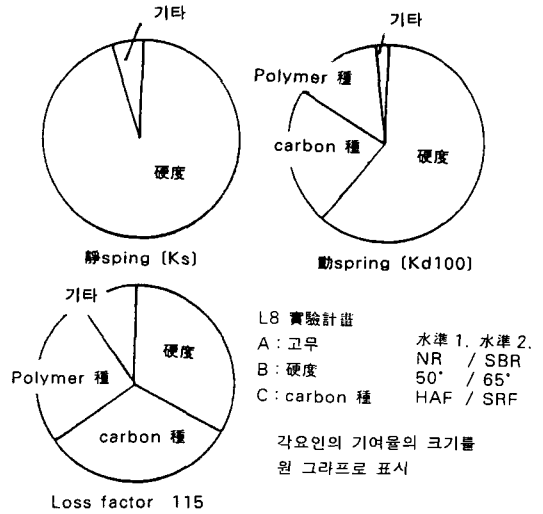


그림 49. 각종배합제의 동특성에 미치는 영향

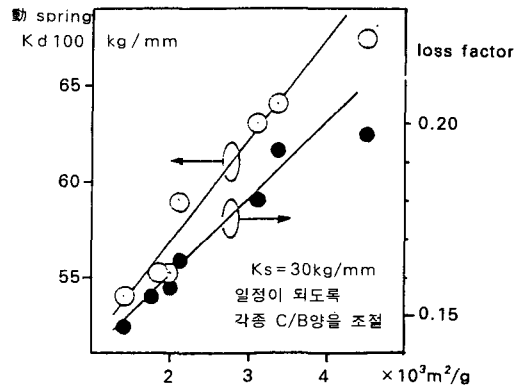


그림 50. Carbon black의 비표면적과 동특성

그림 50에서 배합된 carbon의 비표면적의 총화에 비례하는 것을 알 수 있다. 이것은 carbon 자체가 이같은 동적 성질을 가진 것이 아니고 carbon에 의해 만들어진 고무 matrix의 경계조건이 변형된 것이라고 이해하면 좋다. 곧, carbon의 보강에 의한 탄성률의 변화는 경계조건에 의한 entropy탄성의 변화이고 감쇄의 변화는 polymer와 carbon의 사이에서 일어나는 내부마찰면적과 polymer끼리의 내부마찰 chance의 변화이고 동적탄성율의 변화는 동적시에 부가되는 spring요소 성분의 변화로서 생각 할 수 있다.

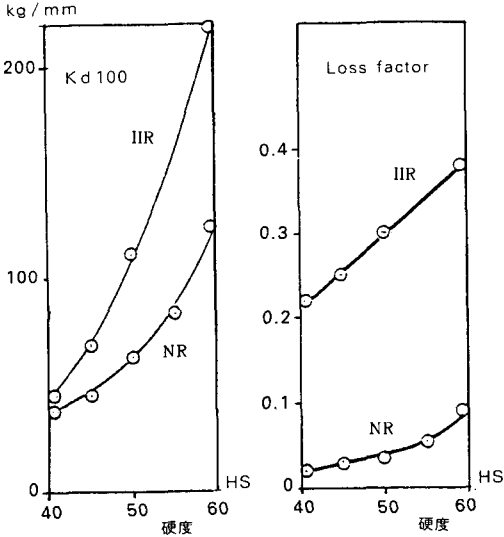


그림 51. 동특성의 경도 의존성

한편, 그림 51에 표시했듯이 NR, IIR의 carbon의 보강에 의한 동적 성질의 곡선위치의 차이는 polymer의 입체장애의 크기가 감소증대 측으로 동특성 구성을 shift 시키고 있다고 이해되고 carbon을 중심으로한 동특성의 기반을 결정하고 있다고 이해된다. 따라서 동특성 설계의 한계를 타파하는 동특성의 개질은

- polymer / carbon black간의 계면 성질의 개질
- polymer, 특히 입체장애의 설계 개질이 큰 개질의 수단이라 사료된다.

## 4-2. 기술과제

### 4-2-1. 저 동배율화

저 동배율화를 달성하기 위해서는 원래 동적 스프링정수의 증대가 carbon의 보강에 의하므로, carbon의 보강이 적은 저 경도재료를 사용하면 좋다. 그러나 지지 spring이 결정되어 있는 경우에는 자연이 큰 단면적을 가진 방진고무의 설계로 되어 공간적인 여유가 없을 때는 실현이 불가능하다. 따라서 일반적으로 내부감쇄를 증대시키지 않고 탄성성분을 크게 하면 되므로, 가교밀도의 증대, 비표면적이 작은 carbon의 보강 혹은 high cis BR의 Polymer

blend가 생각 할 수 있는 수단으로 된다. 단, 내부마찰을 너무 확보하지 않는 경우는 인열강도등이 저하하고, 신뢰성의 점에서 문제가 남는다.

### 4-2-2. 내열 저동배율화

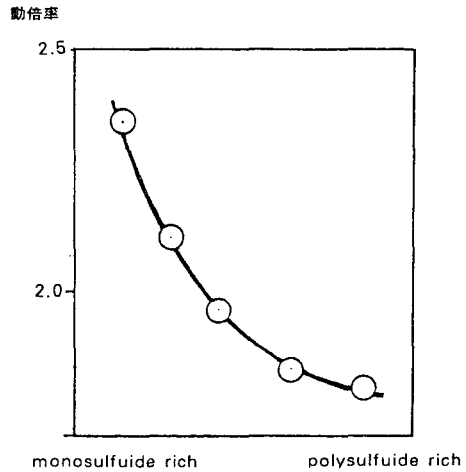


그림 52. 가교의 형태와 동배율

Diene계 재료의 내열화를 가교 형태의 변경 (monosulfide화)에 의해 실현하면 동배율이 악화함을 알 수 있다. Monosulfide는 분자구속이 강하고, 그만큼 운동에 영향을 미친다고 생각된다. 그러나 diene계 고무의 내열화는 가교형태의 변경만이 유효하므로 저 동배율화의 수단을 내열 가황계의 위에, 중복시키는 것이 현실적 대응이라 할 수 있다. 다소나마 내열성이 향상되는 SBR의 사용은 styrene기의 입체장애에 의해 고 동배율화하기 쉽다.

### 4-2-3. 저동배율, 고감쇄화

이 기술은 자동차의 engine mount에 요구되는 특성으로 유명하다. 지금까지의 기술처럼 저 동배율화하면 감쇄가 되지 않고 역으로 고감쇄화하면 고동배율화하여, 기술적인 상반과제 중의 하나이다. 따라서 문제의 해결은 polymer의 입체장애를 도입하면 동특성의 shift, 즉 기반의 변경이 기대되므로 diene계의 polymer에 어떻게 저온성을 확보한 위에 입체장애를

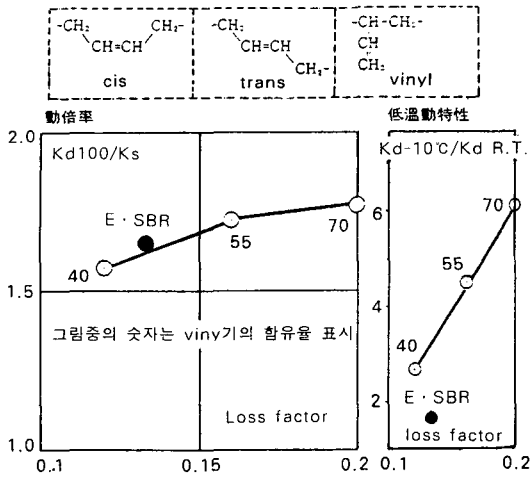


그림 53. 용액중합 SBR의 vinyl기의 동특성효과

부가 할 수 있을까가 문제이다. 일례로 용액중합 SBR의 미세구조인 butadiene의 vinyl기를 입체장애로서 이용한 경우 동특성의 결과는 그림 54와 같다.

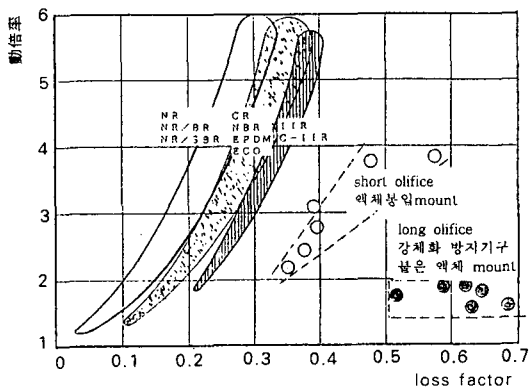


그림 54. 각종재료의 동배율과 loss factor

역시 저온 시에 동특성의 악화가 문제임을 알 수 있다. 나아가 액체봉입형 방진고무를 생각하면 재료의 개질보다 확실히 보장되지만(구조의 감쇄) cost의 상승을 생각치 않을 수 없다.

### 4-3. 기술적인 요구사항

최근 방진고무 diene계 재료에의 요구는 사용한계온도의 확대라고 할 수 있다. NR 재료를 중심으로 하는 사용환경온도는 -3°C~100°C정

도까지 생각할 수 있지만, 특히 고온측의 사용온도로써 120°C까지 요구하고 있다. 이 class의 온도에 대한 고무의 선정은 diene계에서는 CR이다. 기타 EPDM, chloro butyl등이 선정될 수 있지만 실제로 열간중의 물성을 조사하면 NR이 가장 우수하다. 따라서 NR, SRR의 내열화가 필요하다. 이 고온 측에서의 사용온도의 확대는 지지위치의 변화에 의한 방진성능의 변화도 큰문제로 대두 될 것이다. 지지기능의 내열화의 지표인 압축영구줄음율(CS)의 평가에 의하고 지지구성을 그대로 하고 일정한 하중을 가해 열간시의 creep양, 이의 내열개량이 요구된다.

### 4-4. 대응의 고찰

Polysulfide중심의 가교형태와 mono, disulfide중심의 가교형태의 상온내구 비교를 그림 55에 나타냈다. 그림 55에서 내열과 내구의 양립하는 기술적으로 난제임을 알 수 있다. 내열요구가 가교형태에 의해서만이 얻어진다면, 고내구화에 의해 밸런스를 갖는 것이 좋을 것이고 고내구화의 수단이 저동배율화에 모순이 되지 않도록 해야 한다. 이 해결의 사례로서 NR/carbon black사이의 coupling agent 사용에 의한 재료 개량의 결과를 그림 56에 나타내었다.

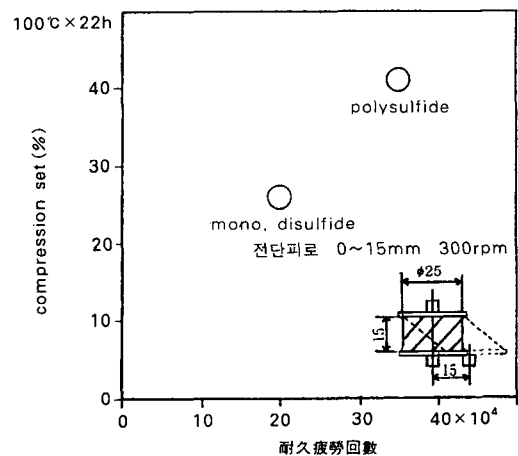


그림 55. 내구피로와 압축영구줄음율의 가교형태에 의한 비교

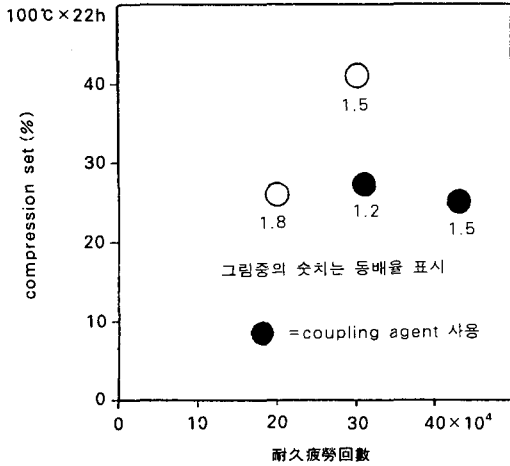


그림 56. Coupling agent 사용에 의한 개질효과

결과적으로 coupling제의 사용에 의한 carbon의 분산의 향상에 의한 고내구화와 polymer/carbon사이의 coupling제에 의한 friction 저감에 의한 저동배율화에 내열가황제의 부여에 의해 달성되어진다고 생각할 수 있다.

한편, 압축영구줄음율의 개량이 그대로 creep 양의 개량으로 되지 않는다는 사실이다.

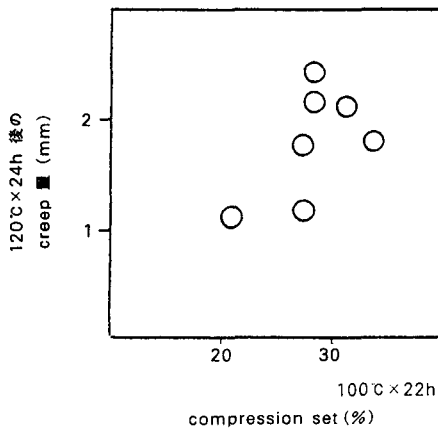


그림 57. 압축영구변형과 Creep양의 관계

### Ⅲ. 방진고무 설계의 실용계산법

#### \*. 고유진동수 계산법

##### 1. 진동 Model과 Model화

진동의 책을 보면 그림 58의 질량, spring계가 처음 나온다. spring 정수(k)(스프링의 힘과 변화량의 비례정수)의 spring위에 질량(M)이 놓여져 있다. 질량의 위치는 1개의 좌표  $x$ 만으로 표시된다.(1 자유도계라 함)

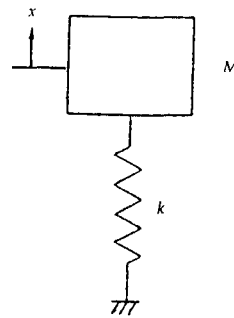


그림 58. 1자유도 진동모델

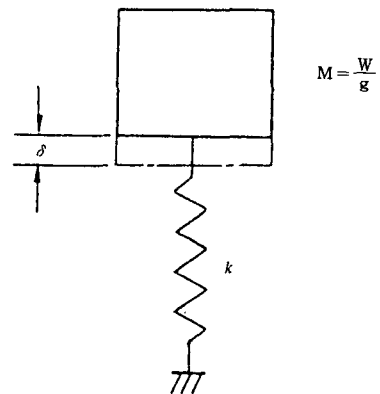


그림 59. Static deflection

실제의 가진원(기계, engine 등) 어느것이 질량이고, 어디가 spring으로서 움직이는지 금방 판단되지 않는 것이 많다. 또 1자유도계등은 존재하지 않는다. 그러나 어려운 다자유도계를 계산하는 것보다 우선 그림 58과 같은 아주 간단한 1자유도계로 바꾸어 계산하는 것이 좋다.

실제로 이 모델이 거의 맞는다.(자유도 수만큼 고유진동수가 있다. 고유 진동수가 서로 벗어나 있다면 각각에 대응한 1자유도계로 근이될 수 있다.)

진동계산에서 가장어려운 것이 이 model화 단계이다. 계산과 실체가 맞지 않는다면[진동의 형은? 질량, 스프링으로서 움직이는 것은? 지지 조건, 고정조건은]라고 생각한다. 즉, model을 다시 생각하는 것이다. model과 실체가 맞으면 당연히 계산과 실체는 맞아진다.

표 16. 정적변위(Static deflection)와 고유진동수

정적변위 $\delta$	고유진동수 $f_n$
1.0 (cm)	5 (Hz)
0.01 (cm) = 0.1 (mm)	50 (Hz)
0.0001 (cm) = 1.0 ( $\mu$ )	500 (Hz)

## 2. 직선진동계

### 2-1. 계산순서

- 1) 중량W, spring정수 k를 구한다.
- 2) 정적변위  $\delta$ 를 구한다.

$$\delta = \frac{W}{k} \dots\dots\dots(1)$$

3)  $\delta$ 를 cm 단위로 하고 다음식으로 고유진동수  $f_n$ 을 구한다.

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}} \text{ (Hz)}, \delta \text{ (cm)} \dots\dots\dots(2)$$

증명 : W, k가 부여된 때 공식에 의해

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{W/g}} \dots\dots\dots(3)$$

(3)식은 다음과 같이 변형한다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{W/g}} = \frac{\sqrt{g}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{W/k}} = \frac{\sqrt{g}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta}}$$

중력가속도  $g=980(\text{cm}/\text{sec}^2)$ ,  $\delta$  (cm)을 넣으면,

$$f_n = \frac{\sqrt{980}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta}} = 4.982 \frac{1}{\sqrt{\delta}} \approx \frac{5}{\sqrt{\delta}}$$

산업현장에서 옛부터 사용되어 지고 있다.

예 1) 중량  $W=200\text{Kg}$ , spring 정수  $k=50$  (Kg/cm)로 한다. 고유진동수를 구하라.

$$\text{정적변위 } \delta = \frac{W}{k} = \frac{200}{50} = 4 \text{ (cm)}$$

$$\text{고유진동수 } f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}} = \frac{5}{\sqrt{4}} = 2.5 \text{ Hz}$$

예 2)  $W=400\text{g}$ ,  $k=250\text{g}/\text{mm}$ ,  $f_n$ 을 구하라

$$\delta = W/k = 400/250 = 1.6\text{mm} = 0.16\text{cm}$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{0.16}} = 12.5 \text{ Hz}$$

예 3) 방진물을 방진스프링의 위에 놓으면, 약 2cm 침하한다. 상하방향의 고유 진동수는?

$$\delta \approx 2\text{cm}, \quad f_n = \frac{5}{\sqrt{2}} \approx 3.5 \text{ Hz}$$

(주-1) 보통 계산식(3)에서는 W, k, g의 3가지가 계산에 필요하다. 식(2)에서는  $\delta$  만으로 끝난다. 이상하다.  $g=980(\text{cm}/\text{sec}^2)$ 로 일정하므로 식(2)의 분자의 (5) 위치에 들어갔다.  $f_n$ 은 원래 W, k의 밸런스이다. 그 밸런스를 표시하고 있는 것이  $\delta$  라고 생각하면 납득이 간다.

(주-2)  $f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}}$  식으로 계산하는 잇점.

- a)  $\delta$ 에서  $f_n$ 을 계산하므로,  $f_n$ 의 느낌을 알기 쉽고 설계센스에 연결하기 쉽다.(표 1)
- b) W, k에서  $\delta$ ,  $\delta$ 에서  $f_n$ 과 2단계 식이므로 단위취급이 쉽고 계산의 실수가 없다.
- c) 중력가속도  $g$ 가 나오지 않고 실제계산에서 일어나기 쉬운  $g$ 의 망각,  $g$ 의 취급잘못 등이 없게 된다.

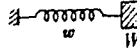
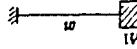
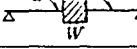
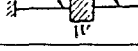
## 2.2. spring 중량의 算入法

Spring 중량 w의 몇분의 1을 본체중량 W에

가산하여 等價중량  $W_e$ 를 구한다.

이  $W_e$ 를  $W$ 대신에 사용하여  $f_n$  구한다.  $W$ 의 산입비율을 표 17에 나타냈다.

표 17. Spring 중량 산입법

spring 형식	본체중량 $W$ 와 spring 중량 $w$	등가중량 $W_e$
Coil spring		$W + 1/3w(4)$
Cantilever		$W + 1/4w(5)$
Simple beam		$W + 1/2w(6)$
Fixed beam		$W + 0.4w(7)$

예 1) 본체중량  $W=24(kg)$ , Coil spring 중량  $w=12(kg)$ , spring 정수  $k=150(Kg/mm)$ , 고유진동수를 구하라?

등가중량  $W_e = W + \frac{1}{3}W = 24 + \frac{12}{3} = 28(kg)$

정적변위

$$\delta = \frac{W_e}{k} = \frac{28}{150} = 0.187(mm) = 0.0187(cm)$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}} = \frac{5}{\sqrt{0.0187}} = 36.6 Hz$$

spring 중량  $w$ 를 무시할 때 ;

$$\delta = \frac{W}{k} = \frac{24}{150} = 0.16(mm) = 0.016(cm)$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{0.016}} = 39.5 Hz$$

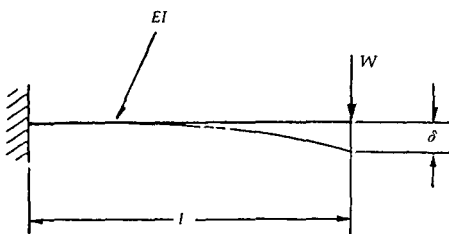


그림 60. Cantilever(편측고정 beam)

이 예에는 spring 중량  $w$ 가 본체중량  $W$ 의 50%나 되므로 spring 중량을 산입한 때와 무시한 때의 차이는  $39.5/36.6=1.08$ 이고, 그차는 약8%이다. Spring 중량  $w$ 는 본체중량  $W$ 에 비해, 보통은 아주 적으므로 무시하고 계산하는 것이다.

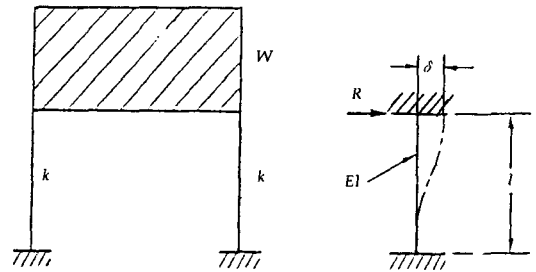


그림 61. Spring hinge

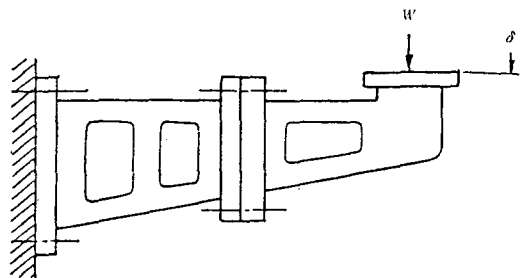


그림 62. Spring 정수의 실측

예 2) 중량  $W=8kg$ 의 편측고정 beam이 있다. beam의 선단의 spring 정수  $k = 4kg/mm$ 이다. 이 편측고정 beam의  $f_n$ 을 구하라.

표 2에서,  $W_e = W + \frac{1}{4}W$

지금  $W=0$ ,  $W_e = 0 + \frac{1}{4} \times 8 = 2.0(kg)$

$$\delta = \frac{W_e}{k} = \frac{2}{4} = 0.5(mm) =$$

$$0.05(cm) = 5 \times 10^{-2}(cm)$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}} = \frac{5}{\sqrt{5 \times 10^{-2}}} = \frac{5}{\sqrt{5} \times 10^{-1}} =$$

$$\frac{5}{\sqrt{5}} \times 10 = 22.4(Hz)$$

이것은 beam의 가장 낮은 고유진동수를 부여한다. (1차 고유진동수, 또는 기본 고유진동수를 말한다)

(주-1) beam의 1차의  $f_n$ 은 예2와 같이 구하지

만,  $f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta_{max}}}(Hz)$  로서  $f_n$ 을 구하여도

가까운 수치를 얻을 수 있다. (이  $\delta_{max} f_n$ 은, 정확한 수치에 대해 편측지지 beam의 80%, 양단지지, 양단고정에는 90%로 된다.)



(주-2) 예1)에서 알수 있듯이 spring 중량 w의 영향은 적다 따라서 w의 산입계수를 잊었을 때, coil spring의 산입율을 1/3정도로 맞추고 만다.

(주-3) 보통은  $W \gg w$ 이지만, 역으로  $W \ll w$ 일 때 편축지지 beam의 산입 식에서 간단한 근이 계산으로 다음식을 얻을 수 있다.

$$f_n' = f_n = f_n \cdot \left[ 1 - 2 \left( \frac{W}{w} \right) \right] = f_n \cdot \left[ 1 - 2 \left( \frac{\text{단말중량}}{\text{구조중량}} \right) \right]$$

$f_n$  : 단말중량  $W=0$  일때의 고유진동수  
 $f_n'$  :  $W$ 를 단말에 추가했을 때의 고유진동수

### 2.3. Spring 정수(k)를 구하는 법

$f_n$ 의 계산에는  $W$ 와  $k$ 가 필요하다.  $W$ 는 간단하지만  $k$ 의 쪽은 어렵다.  $k$ 의 계산법은 다음의 3 가지이다.

spring정수(k) :

1. 계산으로 구함
2. 실측으로 구함
3. 고유진동의 실측치에서 역산으로 구함

#### 1. 계산에서

예 1) 편축지지 beam (그림3 참조)

$$\text{공식에서 Deflection } \delta = \frac{Wl^3}{3EI}$$

$$\therefore \text{spring정수 } k = \frac{3EI}{l^3}$$

예 2) spring hinge (그림 4 참조)

$$\text{공식에서 Deflection } \delta = \frac{Rl^3}{12EI}$$

$$\text{spring정수 } k = \frac{R}{\delta} = \frac{12EI}{l^3}$$

(주-1) 재료역학의 공식에는 하중에서 deflection  $\delta$ 를 구하고 그  $\delta$ 로  $f_n$ 을 구할수 있다. 그러나 이 방법은 너무 형식적이고 좋지 않다. 일단 스프링 정수  $k$ 를 구하고나서  $W$ 에 대한  $\delta$ 를 구하는 것이 좋다. spring정수  $k$ 를 아는 것이 설계에서는 중요.  
 (주-2) 편축 beam의 스프링정수 계산식은 beam이 약한 때는 좋지만, 강해지면 계산과 맞지 않는다. 고정부도 스프링으로서 작용하게 되어 beam의 스프링작용에 고정부의 스프링 작용이 직렬으로 들

어 가기 때문이다.

#### 2. 실측에서 (그림 62 참조)

어떤 복잡한 구조물에서도 하중과 deflection의 실측을 하면 필히  $k$ 가 구해진다. 볼트의 접합부의 강성도 발휘되게 되는 경우( $k$ 가 크면 그렇게 됨)에는 실측외에는 방법이 없다. 실제문제에서는  $k$ 는 계산보다는 실측에서 구하는 것이 좋다.

#### 3. 실측의 고유진동수에서 계산

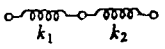
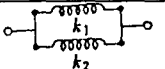
$$f_n(\text{Hz}) \text{ 실측, } f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}}$$

$$\therefore \delta = \left( \frac{5}{f_n} \right)^2 (\text{cm}), k = \frac{W}{\delta}$$

### 2.4. Spring의 직렬, 병렬

이 경우 계산법은 표 18에 나타냈다.

표 18. Spring의 직렬과 병렬

spring 접속	spring 정수, $k_1, k_2$	총합 spring 정수 $k$
직렬		$1/k = 1/k_1 + 1/k_2$
병렬		$k = k_1 + k_2$

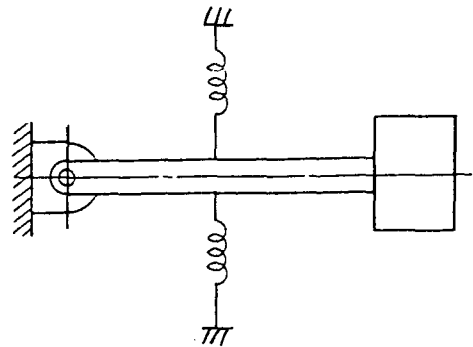


그림 63. 직렬, 병렬

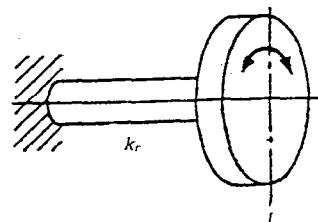


그림 64. Torsion 진동계

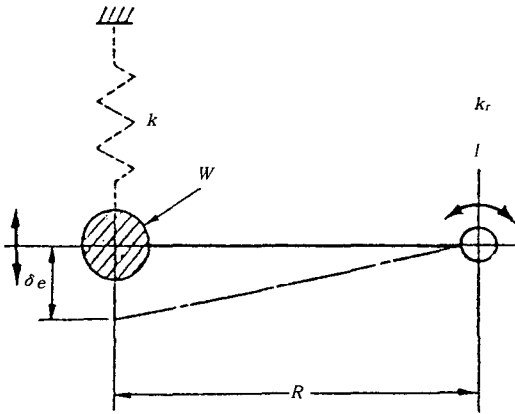


그림 65. Torsion 진동계 ⇒ 직선진동계

예 1)  $k_1 = 10 \text{ kg/cm}$ 의 spring과  $k_2 = 40 \text{ kg/cm}$ 의 spring을 직렬로 연결했을 때 spring 정수  $k$ 를 구하라

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{40}$$

$$= 0.1 + 0.025 = 0.125$$

$$\therefore k = \frac{1}{0.125} = 8.0 (\text{kg/cm})$$

예 2)  $k_1 = 10 \text{ kg/cm}$ ,  $k_2 = 40 \text{ kg/cm}$ 의 spring을 병렬로 연결하였을 때 spring 정수는?

$$k = k_1 + k_2 = 10 + 40 = 50 (\text{kg/cm})$$

### 3. Torsion 진동계 (그림 64 참조)

$f_n$ 의 계산은 직선진동계와 똑같이 한다.

계산의 수순

- 1) 관성 moment  $I(\text{kgfcm})$ , torsion spring정수  $k_t(\text{kg cm/rad})$ 를 정한다.
- 2) 상당 static deflection  $\delta_e$ 를 구한다.

$$\delta_e = \frac{I}{k_t} \dots\dots\dots(11)$$

- 3)  $\delta_e$ 를 cm 단위로 하고 다음식으로  $f_n$ 을 구한다.

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta_e}} (\text{Hz}), \delta_e (\text{cm}) \dots\dots\dots(12)$$

증명] 1)과 같이 단위를 취했을 때, 공식에 의해  $f_n$ 은 다음과 같다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{I/g}} \dots\dots\dots(13)$$

다음에 torsion운동을 직선운동으로 바꾸는 것을 생각한다(그림 65 참조).

관성 Moment  $I$ , 그 중량  $W$ , 관성반경  $R$ 로 한다.

$$I = WR^2 \dots\dots\dots(14)$$

이 때 그림 65와 같이  $I$ 를 반경  $R$ 의 위치의 중량  $W$ 로 바꾼다. torsion spring정수  $k_t$ 는 반경  $R$ 의 위치의 가상적인 spring의 spring 정수  $k$ 로 바꾼다.

그 관계는

$$kR^2 = k_t \dots\dots\dots(15)$$

상기 고유진동수 식을 변형하면

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{I/g}} = \frac{\sqrt{g}}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{I/k_t}} = \frac{\sqrt{g}}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta_e}}$$

$\delta_e$ 에 식(14), (15)를 대입하면

$$\delta_e = \frac{I}{k_t} = \frac{WR^2}{kR^2} = \frac{W}{k}$$

결국, 상당정적변위  $\delta_e$ 는 torsional vibration 계를 직선진동계로 전환했을때, 관성반경  $R$ 의 위치에서 정적변위에 해당한다.

여기에서  $g=980 \text{ cm/sec}^2$ ,  $\delta_e (\text{cm})$ 를 넣으면 전과 같이 식(12)로 된다.

예 1) 관성moment  $I=150(\text{Kg/cm}^2)$ , torsional spring 정수  $k_t=220(\text{Kg/rad})$ 일 때, 고유진동수  $f_n$ 을 구하라?

$$\text{相當正적변위 } \delta_e = \frac{I}{k_t} = \frac{150}{220} = 0.682(\text{cm})$$

$$\text{고유진동수 } f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta_e}} = \frac{5}{\sqrt{0.682}} = 6.1(\text{Hz})$$

예 2)  $I = 85(\text{grcm}^2)$ ,  $k_t = 21.3(\text{kgmm/rad})$ 일 때  $f_n$ 을 구하라

우선  $I$ 와  $k_t$ 의 단위를 맞추어야 함

$$I = 85(\text{grcm}^2)$$

$$k_t = 21.3(\text{kgmm/rad}) = 2.13(\text{kgcm/rad}) = 2.13 \times 10^3(\text{gcm/rad})$$

$$\delta_e = \frac{I}{k_t} = \frac{85}{2.13 \times 10^3} = 3.99 \times 10^{-2}(\text{cm})$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta_e}} = \frac{5}{\sqrt{3.99 \times 10^{-2}}} = \frac{5}{\sqrt{3.99} \times 10^{-1}} = \frac{5}{\sqrt{3.99}} \times 10 = 25(\text{Hz})$$

비틀림진동(torsional vibration)에는 다른 spring정수가 나오는 수가 있다. 그것은 motor의 전자력에 의한 것이다. 다음 예를 참고 바람.

예 3) 극수  $p=4$ 의 동기 motor의 관성모멘트  $I = 500(\text{grcm}^2)$ , 최대부하 torque  $T_{\max}$  (이 이상의 torque가 걸리면 同期를 벗어남)  $= 800(\text{grcm})$ 였다. 이 motor의 고유진동수를 구하라

$$k_t = \frac{p}{2} \cdot T_{\max} = \frac{4}{2} \times 800 = 1600(\text{grcm/rad})$$

$$\delta_e = \frac{I}{k_t} = \frac{500}{1600} = 0.313(\text{cm})$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta_e}} = \frac{5}{\sqrt{0.313}} = 8.9(\text{Hz})$$

기계진동으로서 아주 낮은 주파수가 낮은 진동이 나타나 놀라게 한다. 부하 torque의 변동이  $f_n$ 에 가까우면 공진으로 격하게 진동하고 때로는 동기를 벗어나고 만다. Pulse motor에서 같은 현상이 일어난다. Pulse rate와  $f_n$ 이 가까우면 공진으로 격하게 진동한다.

#### 4. Dunkerley's 식

1자유도에서 대개 계산할 수 있어도, 질량1개뿐인 경우만 계산할 수 없다는 것이 문제이다. Beam의 경우에는 Dunkerley의 근이식이라

는 편리한 것이 있다(식 16). 이것이라면 질량이 여럿 있어도 문제 될 것이 없다.

$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_0^2} + \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2} + \dots + \frac{1}{f_N^2} \dots\dots\dots(16)$$

$\delta$ ;  $N$ 개의 질량이 작용한 때의 기본고유진동수 (가장낮은 고유진동수, 1차고유진동수)

$f_0$ ; beam뿐인 때의 고유진동수

$f_1 \dots f_n$ ; 각질량이 단독으로 작용한 때의 각각의 고유진동수

각질량이 단독으로 작용한 때의 정적변위를 (cm) 각각  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_N$ , beam의 자중에 의한 정적변위를  $\delta$  (cm)로 하면

$$f_0 = \frac{5}{\sqrt{\delta_0}}, f_1 = \frac{5}{\sqrt{\delta_1}}, f_2 = \frac{5}{\sqrt{\delta_2}}, f_3 = \frac{5}{\sqrt{\delta_3}}, \dots, f_N = \frac{5}{\sqrt{\delta_N}}$$

이것을 식(16)에 대입하면

$$\frac{1}{f^2} = \frac{\delta_0}{25} + \frac{\delta_1}{25} + \frac{\delta_2}{25} + \frac{\delta_3}{25} + \dots + \frac{\delta_N}{25} = \frac{1}{25}(\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_N)$$

정적변위의 합계가,  $N$ 개의 질량이 동시에 작용한 때의 등가의 정적변위로 되어 있다. 이것을 사용하면 계산은 자유도의 경우와 같게 된다.

1) 각 중량에 대한 정적변위(휨)를 계산한다.

$\delta_1, \delta_1, \dots, \delta_N$ , 자중에 의한 정적변위  $\delta_0$ 를 계산 ( $\delta_0$ 가 적을 때는 생략)

2) 변위(휨) 합계  $\delta_t$ 를 계산

$$\delta_t = \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n \dots\dots\dots(17)$$

3)  $\delta_t$ 의 단위를 cm로 하고 다음식에서 고유진동수를 계산

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta_i}} (\text{Hz}), \delta_i (\text{cm}) \dots \dots \dots (18)$$

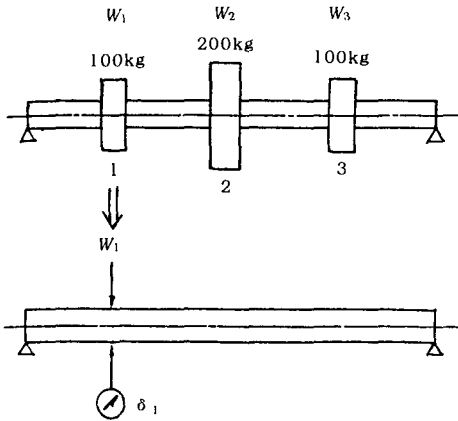


그림 66. 다질량의 bending (휨) 고유진동수 (dunkerley 방법)

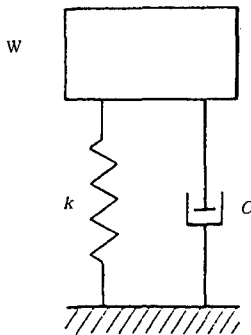


그림 67. 감쇄가 있는 진동계

예 1) 그림 66과 같은 축계의 bending 고유진동수를 구하라?

실측변위(휨)는 다음과 같았다.

하중위치 i	하 중 wi (kg)	하중위치에서의 변위 δi (mm)	비 고
1	100	0.5	다른하중없음
2	200	3.0	"
3	100	0.5	"

변위(휨) 합계  $\delta_i = 0.5 + 3.0 + 0.5 = 4(\text{mm}) = 0.4(\text{cm})$

기본고유진동수  $f = \frac{5}{\delta_i} = \frac{5}{\sqrt{0.4}} = 7.9(\text{Hz})$

주) 상기계에서 軸의 재질, 수치를 알면 재료역학의 공식에서도 계산 할 수 있다.

### 자유진동과 강제진동

이 계산에는 그림 67과 같이 중량W, spring 정수 k에 감쇄계수 C가 붙여져 있다.

C는 감쇄력과 속도의 비례정수이다.

#### 1. 자유진동

추W를 밀어 놓으면 추는 진동을 시작한다. 감쇄가 없으면(C=0), 언제까지라도 진동을 계속한다. 실제는 어디에도 C가 있으므로 진동은 점점 적게되어 중지하고 만다.

C가 크게되면 진동의 감속은 크게 된다. 더욱 C가 크게 되면 전혀진동을 하지 않게 된다. 결국임계 상태로 되고 만다. 이때의 C를 Cc라고 하며, 임계감쇄 정수라고 한다. Cc는 W와 k로 결정되며 다음 식으로 구할 수 있다.

$$C_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{W}{g} \cdot k} (\text{kg/cm/sec}) \dots \dots \dots (19)$$

W = 중량(kg)      g = 중력 가속도 980cm/sec<sup>2</sup>  
k = spring 정수 (kg/cm)

$$C_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{80}{100} \cdot 100} = 2 \cdot \sqrt{8.16} = 5.7(\text{kg/cm/sec})$$

예 2) W=500(gr), fn=80(Hz) 였다. Cc를 구하라?  
단위를 맞추면

$$W = 500\text{g} = 0.5(\text{kg})$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}}$$

$$\therefore \delta = \left(\frac{5}{f_n}\right)^2 = 0.00391$$

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{0.5}{0.00391} = \frac{500}{3.91} = 128(\text{kg/cm})$$

$$C_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{W}{g} \cdot k} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0.5}{.980} \cdot 128} =$$

$$2 \cdot \sqrt{0.0653} = 2 \times 0.256 = 0.51(\text{kg/cm/sec})$$

n山目的 진폭감쇄비  $\left(\frac{x_n}{x_0}\right)$ , 감쇄비

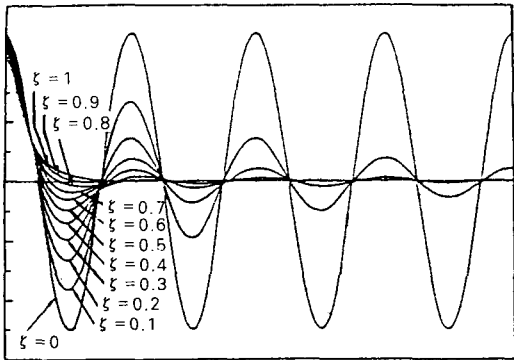


그림 68. 감쇄비  $\zeta$ 와 감쇄의 속도

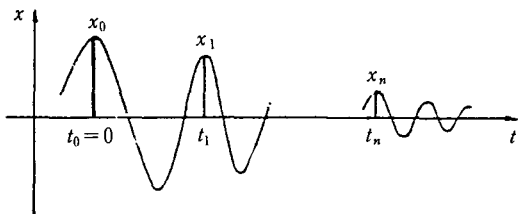


그림 69. 감쇄진동에서  $\zeta$ 와  $f_n$ 을 구하는 법

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{x_n}{x_0}\right)}{2\pi n}$$

주기  $\tau = \frac{(t_n - t_0)}{n}$ , 고유진동수  $f_n = \frac{1}{\tau}$

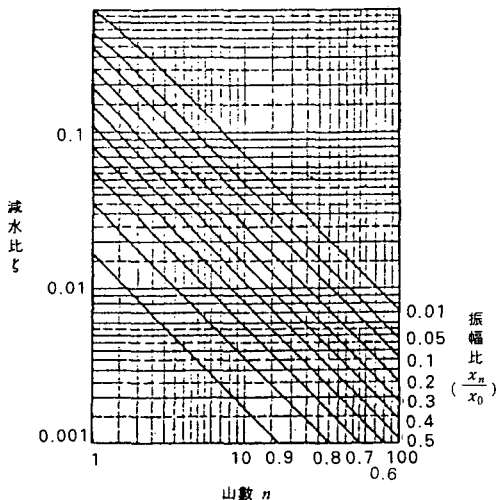


그림 70. 진폭감쇄비  $\left(\frac{x_n}{x_0}\right)$  山數  $n$ 과 감쇄비  $\zeta$

감쇄의 정도는  $C$ 와  $C_c$ 의 비  $\zeta$ 로 나타낼 수 있다.  $\zeta=1.0$ 이 임계감쇄상태를 나타냄

자유진동의 감쇄상태의  $\zeta$ 에 의한 변화를 표시한 것이 그림 68이다. 감쇄비가 늘어나면 점점 감쇄가 빠르게 되고 감쇄비  $\zeta=0.5$ 에서 대개 1山,  $\zeta$ 가 0.7이상으로 되면 실제로 거의 진동 없게 된다. 또 진동이 보여지는(진동의 구배(山)를 셀수 있는)상태에서는 진동의 주기가 거의 변화하지 않는다고 판단 할 수 있다.

감쇄상태에서 감쇄비  $\zeta$ 를 구하는 법이 그림 69이다. 이 계산식 (20)은  $\zeta < 0.4$ 에서 성립한다. 근이식이지만 山이 셀수 있는 정도에서는 근이오차  $\approx 0$ 이다.

그림 70에서는 계산을 graph로 하고 있다.

예 3) 그림 71의 실험에서 얻은 감쇄진동의 curve를 나타냈다. 이 경우 감쇄비  $\zeta$ 와 고유진동수  $f_n$ 을 구하라?

$t_0 = 0, \quad x_0 = 38(\text{mm})$

$n = 6\text{山目}, \quad t = 4.4\text{sec}, \quad x_6 = 5(\text{mm})$

(이  $x_0, x_6$ 는 원래 기록지상의 기록이다, 그림은 축소되므로 틀린다)

그림 70의 graph  $\frac{x_6}{x_0} = \frac{5}{38} = 0.13, n=6$ 으로  $\zeta=0.054$

계산  $\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{x_n}{x_0}\right)}{2\pi n} = \frac{-\ln\left(\frac{5}{38}\right)}{2\pi \times 6} = 0.054$

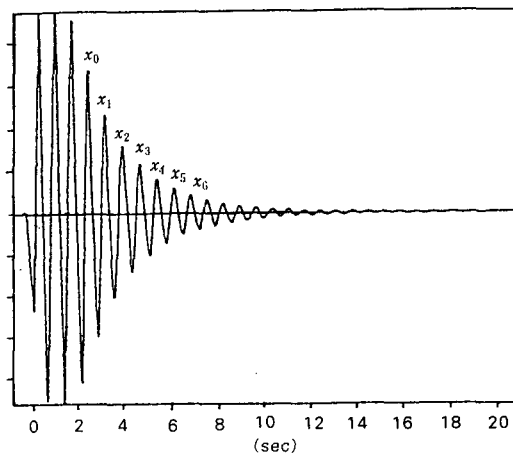


그림 71. 감쇄진동의 측정의 예

주기  $\tau = \frac{(t_n - t_0)}{n} = \frac{(4.4 - 0)}{6} = 0.733(\text{sec})$

고유진동수  $f_n = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0.733} = 1.36(\text{Hz})$

2. 강제진동

床의 진폭이  $a_0$ , 진동수  $f$  일 때  $W$ 의 절대진폭  $a$ 가 어떻게 되는가를 표시한 것이 그림 72이다. 이 그림을 공진선도라 한다. 종축에 진폭비( $\frac{a}{a_0}$ ), 횡축에 진동수비( $\frac{f}{f_n}$ ) 을, 보기 쉽도록 대수 plot하고 있다.

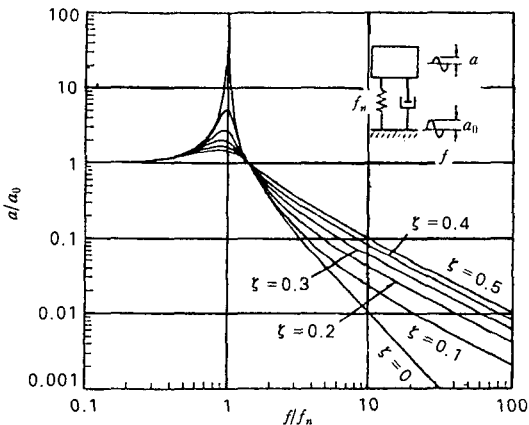


그림 72. 진동수비 ( $\frac{f}{f_n}$ )와 진폭비 ( $\frac{a}{a_0}$ )

( $\frac{f}{f_n}$ )의=1(床(floor)의 진동수  $f$ 와 고유진동수  $f_n$

이 일치)이고 ( $\frac{a}{a_0}$ )는 최대이다.

공진이 있다. 이때의 공진비를 공진배율  $Q$ 로 표시한다.

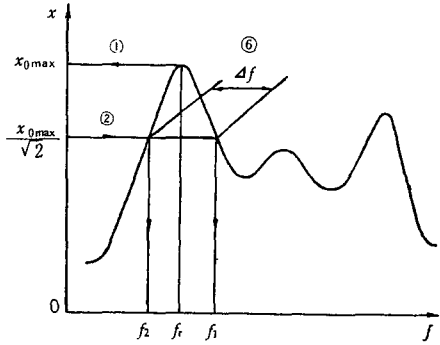
공진배율  $Q = \text{진폭비} (\frac{a}{a_0})_{\text{max}}$

$Q$ 의 측정법 :  $f$ 를 변화시켜 진폭  $a$ 의 변화를 측정하면 peak는 확실해지지만 그 방법은 여러 가지이다. peak를 기준으로 하여 그림 73과 같이 구할 수 있다.

床과  $W$ 간의 상대진폭  $a_r$ 과 상의 진폭  $a$ 와의 비 ( $\frac{a}{a_0}$ )와 ( $\frac{f}{f_n}$ )의 관계를 표시한 것이 그림 74

이다. ( $\frac{a_r}{a_0}$ )<sub>max</sub> = ( $\frac{a}{a_0}$ )<sub>max</sub> 이다.

기계진동에는 적극적으로 감쇄를 도입하지 않는 한 공진 peak는 날카롭다. 결국  $Q$ 는 크다.



⑤ 共振同波數  $f_r = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$

⑥ 振動數\*  $\Delta f = f_1 - f_2$

⑦ 共振倍率  $Q = \frac{f_r}{\Delta f}$

그림 73. 공진곡선에서 공진배율  $Q$ 의 계산법

3. 자유진동과 강제진동의 관계

감쇄가 적으면 공진peak는 높다. 감쇄비  $\zeta$ 와 공진배율  $Q$ 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$Q = 1/2 \zeta$  .....(21)

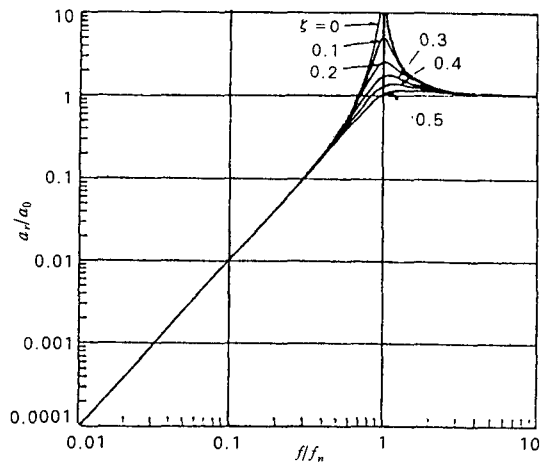


그림 74. 진동수비 ( $\frac{f}{f_n}$ )와 상대진폭비 ( $\frac{a_r}{a_0}$ )

$\zeta$ 를 알면  $Q$ 를 알고, 공진배율( $Q$ )를 알면 감쇄비 ( $\zeta$ )를 알 수 있다.

예 1) 감쇄비( $\zeta$ )=0.02였다. 공진배율  $Q$ 의 크기는?

$$Q = 1/2 \zeta = 1/2 \times 0.02 = 25$$

기계진동에는  $\zeta$ 가 수%이하가 보통이다 따라서  $Q$ 는 곧 몇십배로 되므로 공진은 굉장한 것이다.  $Q$ 와 감쇄의 관계를 식으로 쫓아가면, 용이하게 알 수 있다. 자유진동에는  $\{Q$ 의  $\ln(\text{peak})$ 에서 공진은 처음의 5%이하)로 된다. (정확히 4.3%) 진폭이 처음의 5%이하로 되는 시간을, 진동이 끝나는 시간  $t_f$ 라하면 진동 주기  $\tau$ 일 때

$$t_f = Q \cdot \tau = \frac{Q}{f_n} (\text{sec}) \dots \dots \dots (22)$$

$\tau$  ; 진동주기 (sec)

$f_n$  ; 고유진동수 (Hz) ,  $f_n = 1/\tau$

그림 73의  $Q$ 구하는 법과 관계시키면

$$t_f = \frac{Q}{f_n} = \frac{(f_n/\Delta f)}{f_n} = \frac{1}{\Delta f} (\text{sec}) \dots \dots \dots (23)$$

결국  $t_f$ 는 peak의 半値幅  $\Delta f$ 의 역수이다.(peak의  $1/\sqrt{2}$ 의 지점의 폭  $\Delta f$ 이지만, 에너지 적으로는 半分이므로 생략하여 반치폭이라 한다.)

예 2) 그림 74의 측정결과에서 공진배율  $Q$ , 진동이 끝나는 시간  $t_f$ 를 구하라?

자유진동(전 page)의 예3의 결과에서  $\zeta$ 는 0.054,  $f_n = 1.36\text{Hz}$

$$\therefore Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{2 \times 0.054} = 9.3$$

$$t_f = \frac{Q}{f_n} = \frac{9.3}{1.36} = 6.8(\text{sec}) \approx 7(\text{sec})$$

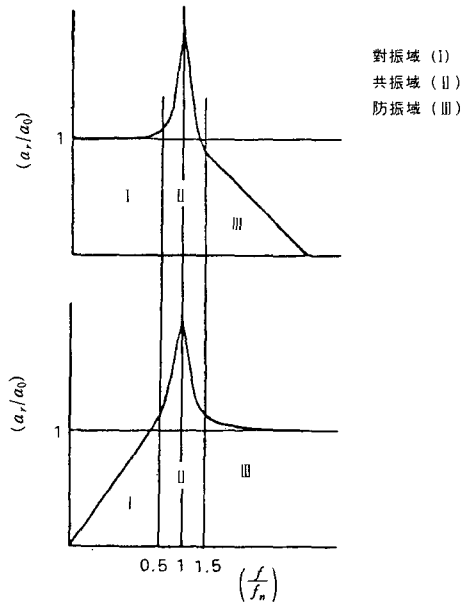
이 예에서는 주기  $\tau = 0.73(\text{sec})$ 가 구해져 있으므로

$$t_f = Q \cdot \tau = 9.3 \times 0.73 = 6.8(\text{sec}) \approx 7(\text{sec})$$

\* 공진선도의 생각법과 사용법

진동을 생각할 때 그림 75와 같이 3가지의 영역으

로 나누면 편리하다. 각각의 영역에 이름을 붙일 수 있다 (그림 75).



- (I) ; 對振域 ( $f$ 는  $f_n$ 의  $\pm 50\%$  이하)
- (II) ; 공진역 ( $f$ 는  $f_n$ 의  $\pm 50\%$  이내)
- (III) ; 방진역 ( $f$ 는  $f_n$ 의  $\pm 50\%$  이상)

그림 75. 對振역(I), 공진역(II), 방진역(III)

1. 對振域

고유진동수  $f_n$ 에 비해 강제진동수  $f$ 가 천천히 움직이므로 따라서 움직인다. 기계에서는 외부진동에 의한 상대변위가 적을수록 진동에 강하다. 결국 대진성이 있는 것으로 된다. 이 영역에서는 상대변위  $a_r$ 이라고 생각한다

$$\left(\frac{f}{f_n}\right) < 0.5 \text{에서는} \left(\frac{a_r}{a_0}\right) \approx \left(\frac{f}{f_n}\right)^2 \dots \dots \dots (24)$$

이영역에서는 그림 74에서 알수 있듯이 감쇄효력을 발휘하지 않는다.

예) 어떤 측정기에서 센서의 취부부 base의 진동을 진폭  $2\mu$ , 진동수  $25\text{Hz}$ 였다.

센서와 base 사이의 허용상대 변위를  $0.1\mu$ 로 한다. 센서 head부의 증량

$W = 400\text{gr}$ 에 대해, base 지지 arm의 필요한 강성을 구하라?

$$a_0 = 2(\mu), f = 25(\text{Hz}), a_r \leq 0.1(\mu)$$

우선 센서 내부의 필요한 고유진동수  $f_n$ 을 구한다.

$$\left(\frac{a_r}{a_0}\right) = \left(\frac{f}{f_n}\right)^2 \cdot \frac{0.1}{2.0} = \left(\frac{25}{f_n}\right)^2$$

$$\therefore f_n = \frac{25}{\sqrt{\frac{0.1}{2.0}}} = 112(\text{Hz})$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}} \therefore \delta = \left(\frac{5}{f_n}\right)^2 = \left(\frac{5}{112}\right)^2 =$$

$$0.002(\text{cm}) = 2 \times 10^{-3}$$

$$W = 400\text{gr} = 0.4\text{kg}$$

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{0.4}{2 \times 10^{-3}} = 200(\text{kg/cm}) = 20(\text{kg/mm})$$

· head부 지지 arm의 강성은 spring 정수 k로 나타낼 수 있으며, 20(kg/mm)로 설계한다.

· 공간역 진폭전달율  $\left(\frac{a}{a_0}\right)$ 를 진동수비  $\lambda = \left(\frac{f}{f_n}\right)$ 와 감쇄비  $\zeta$ 로 나타낸 것이 다음의 식이다.

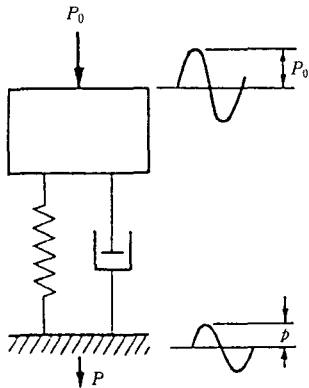


그림 76. 힘의 전달율  $\left(\frac{p}{p_0}\right)$

$$\left(\frac{a}{a_0}\right) = \frac{\sqrt{1+(2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \dots\dots\dots(25)$$

$$\tan \delta = (2\zeta\lambda)^2$$

이식은 그림 76의 힘의 전달율  $\left(\frac{p}{p_0}\right)$ 일 때, 똑같은 형이다.

예 1) 감쇄비  $\zeta=0.02$ 로 한다. 강제진동수  $f$ 를 고유진

동수  $f_n$ 에 대해,  $f = f_n$  전후에  $\pm 20\%$  변화시키면 진폭전달율  $\left(\frac{a}{a_0}\right)$ 는 어느정도 변화하는가?

$$\zeta = 0.02, \quad \lambda = (f / f_n) = 0.8$$

$$\left(\frac{a}{a_0}\right) = \frac{\sqrt{1+(2 \times 0.02 \times 0.8)^2}}{\sqrt{(1-(0.8)^2)^2 + (2 \times 0.02 \times 0.8)^2}}$$

$$= 1.0005/0.3614 = 2.8$$

같은 계산식에서

$$\lambda = 1.0 \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 25.0$$

$$\lambda = 1.2 \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 2.3$$

$\therefore$  약20%의 변화에서 약10배의 진폭변화가 있다.

예 2)  $\zeta=0.1$ 로 하면 어떤가?

예1과 같은 계산에 의해

$$\lambda=0.8 \text{에서} \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 2.6$$

$$\lambda=1.0, \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 5.1^*$$

$$\lambda=1.2 \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 2.1$$

\*  $Q = 1/2\zeta = 1/2 \times 0.1 = 5.0 \neq 5.1$ 인 것은  $Q = 1/2\zeta$ 이 근이식이기 때문.

$\zeta=0.1$ 로 크므로 변화폭은 약2배로 적게된다. 따라서,  $\pm 40\%$  변화시키면 진폭변화율은 약5배로 된다.

$$\lambda = 0.6, \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 1.2$$

$$\lambda = 1, \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 5.1$$

$$\lambda = 1.4, \quad \left(\frac{a}{a_0}\right) = 1$$

## 2. 방진역

이 영역에서는 고유진동수  $f_n$ 에 비해, 강제진동수  $f$ 가 너무 빠르므로, 추 W가 움직이지 않게 되는 것이다. 그 때문에 진동이 전달되기 어렵기 때문에 방진으로 사용할 수 있다.

감쇄가 적을 때(보통적용), 다음의 근이식이 성립한다.



진동수비  $(\frac{f}{f_n}) > 2$ , 진폭전달율  $(\frac{a}{a_0}) \approx (\frac{f}{f_n})^2$

예 1) 床진동이 진폭  $a_0 = 10 \mu$ , 진동수  $f = 20\text{Hz}$ 로 한다. 방진대상에서의 진폭  $a = 1 \mu$ 이하로 하기 위해서는 방진대 + 방진spring의 계의 고유진동수  $f_n$ 은 몇 Hz로 하는가?  
방진대 중량  $W = 150\text{kg}$ 일 때, 방진 spring의 spring 정수  $k$ 는 얼마냐?

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1}{10} = \left(\frac{f_n}{f}\right)^2 = \left(\frac{f_n}{20}\right)^2$$

$$\therefore \left(\frac{f_n}{20}\right) = \sqrt{\frac{1}{10}} \therefore f_n = 20 \times \frac{1}{\sqrt{10}} = 6.3(\text{Hz})$$

$$f_n = \frac{5}{\sqrt{\delta}} \therefore \delta = \left(\frac{5}{f_n}\right)^2 = \left(\frac{5}{6.3}\right)^2 = 0.63(\text{cm})$$

$$k = \frac{W}{\delta} = \frac{150}{0.63} = 238(\text{kg/cm}) = 23.8(\text{kg/mm})$$

진폭을  $1 \mu$ 이하로 하는 것은  $k < 23.8(\text{kg/mm})$   
 $\therefore k = 20(\text{kg/mm})$ 으로 한다.

(주 1)  $(\frac{a}{a_0}) \approx (\frac{f}{f_n})^2$  이므로 방진효과를 올리는 데는  $f_n$ 을 적게 하지만, 이것에도 한계가 있다. 예를들면  $f_n$ 을 1HZ로 하면,  $f_n = 5/\sqrt{\delta} = 1$ 이므로, 정적변위  $\delta = 25\text{cm}$ 로 되어, coil spring에는 성립이 안되고 공기 spring이라야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 山下晉三 : 日本고무協誌, **42**, 661(1969).  
村上謙吉 : 日本고무協誌, **47**, 98(1974).  
G. J. Lake : Rubber world, **104**, 39(10), 1972.
2. J. C. Anbelarg et. al., : Rubb와 Chem., Technol., **36**, 1497(1963)
3. 前田守一 : 日本고무協誌, **41**, 934(1968).
4. C. T. Derham : NRPPRA 3rd Rubber Eng. Conf 1973 "paper F".
5. G. J. Lake : Rubber world, **104**, 30(1972).  
福田正成 : 日 機學誌, **67**, 726(NO5, 1964).
6. Noguch, K., Yoshioka, A., : Presented at a meeting of rubber Div, ACS., Apr, 1986.
7. 辰崎英雄 : 日本고무協誌, **63**, 646(1990).
8. Gonzalez, H. L., Ibarra, R. L : ACTA, **26**(1), 85(1987).
9. 日本 特開昭 58-313042.
10. 自動車技術會 編 : 自動車技術 handbook(基礎, 理論) p. 300 (1990).
11. 見田 외 : 自動車技術, **40**, 1289(1986).
12. 久留官 : 日本고무協誌, **45**, 184(1972).
13. Prcttyman : Ind, Eng, Chem., **32**, 1294 (1942).
14. F. M. Smith, 913-131923 "Development of High Temperature Resistant".
15. M. Braden, etal : R. C. T. **33**, 1156(1960).